

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національна академія наук України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Єгоров Вадим Анатолійович

УДК 543.423.1

ДИСЕРТАЦІЯ
«ПІДВИЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ТА СИСТЕМ АТОМНО-ЕМІСІЙНОГО
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ»

Спеціальність: 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем
(Фізико-математичні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних
наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В. А. Єгоров

Науковий керівник: Луценко Владислав Іванович, доктор
фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Сгоров В. А. **Підвищення метрологічних та експлуатаційних характеристик елементів та систем атомно-емісійного спектрального аналізу.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем (Фізико-математичні науки). — Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню завдання удосконалення методів і апаратури одного з найбільш поширених способів елементного аналізу речовини – атомно-емісійного спектрального аналізу (АЕСА).

Проведення атомно-емісійного спектрального аналізу складається з операцій пробовідбіру необхідної кількості досліджуваного зразка, перетворення його до стану плазми, здійснення спектрального аналізу випромінювання плазмового утворення, визначення аналітичних параметрів спектра. За результатами вимірювань аналітичних параметрів, використовуючи калібрувальні дані, робиться висновок про склад досліджуваного зразка. Забезпечення повторюваності та однорідності вимірювань потребує встановлення виду функціональної залежності між вхідними керівними сигналами та вихідними параметрами кожного блоку.

В результаті роботи виконана розробка комплексу апаратури, що охоплює всі ланки процесу атомно-емісійного аналізу, а саме: збудження спектру зразка, що аналізується, розкладання оптичного випромінювання зразка в спектр, реєстрації та аналізу спектра. З застосуванням розроблених приладів проведені дослідження по виявленню фізичних закономірностей процесів збудження, аналізу та реєстрації спектрів плазмових утворень в апаратурі АЕСА, та використання цих закономірностей для удосконалення метрологічних і експлуатаційних характеристик аналітичної апаратури.

Зроблено аналітичний огляд існуючих на даний момент методів збудження, просторового розкладання та реєстрації оптичних спектрів. Підкреслюється, що поява нових джерел збудження спектру, таких як ВЧ і НВЧ плазмотрони, лазери, джерела тліючого розряду не скоротила кількість аналізів, що виконуються за допомогою дуги й іскри. Іскрові та дугові генератори залишаються найпоширенішими у виробничій і лабораторній практиці і їх розробка та удосконалення залишається актуальним завданням. Представлені шляхи розвитку оптичних спектральних приладів і систем реєстрації спектра.

Підкреслюється, що у випадку дугових і іскрових джерел збудження спектру, генерація плазми є однією з найменш контрольованих ланок в ланцюжку приладів, що реалізують процеси в АЕСА. Це пов'язано з нестійкістю розрядних явищ в аналітичному проміжку, нестабільністю розряду в часі та просторі, залежністю від електричних параметрів розряду, конфігурації електродів, їх хімічного складу та складу атмосфери розрядної камери. Тому генератору плазми приділена значна увага. А саме наведені особливості схемотехніки та конструкції дугового імпульсного генератора плазми з цифровим програмним керуванням параметрами розряду, що має широкий діапазон регулювання параметрів збудження плазми в залежності від властивостей зразка який аналізується і методик проведення аналізу. Проведені порівняльні випробування створеного генератора з промисловим генератором.

Розроблено шляхи удосконалення оптичних спектральних блоків багатоканальних спектрометрів для роботи в ближньому інфрачервоному, видимому та ультрафіолетовому діапазонах. Досліджено декілька макетних варіантів оптичних блоків з некласичною дифракційною ґраткою і схрещеною дисперсією. В результаті використання ґратки з криволінійними штрихами й нерівномірним кроком нарізки вдвічі зменшено розміри спектрометра з одночасним зменшенням аберацій і поліпшенням оптичної роздільної здатності. Виконані розрахунки та макетування декількох

оптичних схем зі схрещеною дисперсією, показані їх переваги в поєднанні з сучасними матричними сенсорами.

Спроектовано оптичну схему і виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра, що дозволяє одержувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

Досліджені технологічні, конструкційні та схемотехнічні особливості камер реєстрації оптичних спектрів на багатоканальних напівпровідникових фотоприймачах. Розроблено і впроваджено декілька спектральних камер з гнучкою архітектурою для реєстрації оптичних спектрів в лабораторних і промислових умовах, що здатні реєструвати спектр без розривів в діапазоні від 190 до 1100 нм, а також модифікацію з термоелектричним регулюванням температури фотоприймачів. Виконані роботи по створенню апаратури реєстрації гіперспектральних зображень плазмових утворень.

На базі виготовленої апаратури виконані дослідження та розроблено і випробувано декілька способів і методик, що дозволяють суттєво розширити можливості спектральної апаратури. В тому числі спектральної роздільної здатності, динамічного та температурного діапазону. Проведені порівняльні дослідження джерел спектра, оптичних спектральних приладів і фотоприймачів.

Наукова новизна отриманих результатів

- Вперше розроблено спосіб збільшення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів при реєстрації спектрів який базується на удосконаленні спектрометра, що дозволяє виконати мікрометричний зсув зображення спектра щодо пікселів детекторних лінійок, і відповідного алгоритму обробки спектральних даних. Це відкриває можливість збільшення роздільної здатності аж до оптичної роздільної здатності спектрометра.

- Вперше запропоновано спосіб лінеаризації світлосигнальної функції ПЗЗ фотоприймачів, що не мають антиблумінга, з застосуванням паралельної реєстрації із зустрічним транспортуванням зарядів в ПЗЗ детекторах.
- Вперше розроблено методику визначення температури фотоприймача по параметрах вихідного сигналу без застосування додаткових температурних сенсорів.
- Розв'язана задача коректного визначення координати та амплітуди спектральної лінії, при реєстрації багатоеlementним фотоприймачем. Надано розвитку методу максимальної правдоподібності стосовно розв'язання задачі фотометрування спектрів. Представлена залежність точності визначення основних параметрів лінії, від форми спектральної лінії та співвідношення сигнал / шум.
- Отримали розвиток методи контролю нелінійностей фото ПЗЗ щодо виконання принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції, що дозволило знайти пояснення порушенню закону взаємозамінності для випадку малих рівнів експозицій.

Практичне значення отриманих результатів

- Запропоновані способи збільшення роздільної здатності, динамічного діапазону, визначення температури фотоприймачів і методи обробки експериментальних даних відкривають шляхи для поліпшення метрологічних характеристик апаратури АЕСА в лабораторній і виробничій практиці.
- Запропонована методика визначення температури сенсора використовується в програмному забезпеченні розроблених спектральних камер, що дозволяє використовувати їх не тільки у лабораторних, а і в виробничих умовах без застосування допоміжних температурних датчиків.
- Створений дуговий генератор ЦУГ-2 має високу економічність, (ККД генератора перевищує 80%), розширені функціональні й сервісні можливості та значно поліпшені масо-габаритні характеристики. Генератор може

працювати при значних коливаннях напруги в мережі живлення (від 160 до 250В),

- За результатами випробувань, запропоновані під час проєктування генератора технічні рішення забезпечили зменшення в три рази середньоквадратичного відхилення (СКВ) результатів вимірювань, в порівнянні з серійним генератором УГЭ-4.

- Розроблено і виготовлено спектрогеліограф, що здатен отримувати зображення Сонця одночасно у двох лініях спектра.

Результати досліджень і розроблені методики були використані при розробці спектрофотометричної апаратури та алгоритмів обробки експериментальних даних. Аналітична апаратура розроблена і виготовлена за участю автора впроваджена більш ніж двох десятках підприємств та лабораторій України.

Ключові слова: атомно-емісійний спектральний аналіз, дугове джерело спектра, оптичний спектрометр, ПЗЗ фотодетектор, роздільна здатність, динамічний діапазон.

ABSTRACT

Vadim A. Yegorov. **Improving metrological and operational characteristics of elements and systems of atomic emission spectral analysis.** – Qualification scientific work is as a manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physical and Mathematical Sciences: Speciality 01.04.01 – Physics of devices, elements and systems (Physical and Mathematical Sciences). — O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving the problem of improving the methods and equipment of one of the most common methods of elemental analysis of matter – atomic emission spectral analysis (AES).

Carrying out atomic emission spectral analysis consists of operations of sampling the required amount of the test sample, converting it to the state of plasma, carrying out spectral analysis of radiation of plasma formation to determine the analytical parameters of the spectrum. Based on the results of measurements of analytical parameters, using calibration data, a conclusion is made about the composition of the sample. Ensuring the repeatability and homogeneity of measurements requires the establishment of a type of functional relationship between the input control signals and the output parameters of each unit.

As a result, the development of a set of equipment covering all parts of the process of atomic emission analysis, namely: excitation of the spectrum of the analyzed sample, decomposition of optical radiation of the sample into the spectrum, registration and analysis of the spectrum. With the use of the developed devices researches on revealing of physical laws of processes of excitation, analysis and registration of spectra of plasma formations in the AES equipment, and use of these laws for improvement of metrological and operational characteristics of the analytical equipment are carried out.

An analytical review of the currently existing methods of excitation, spatial decomposition and registration of optical spectra is made. It is emphasized that the emergence of new sources of excitation of the spectrum, such as HF and microwave plasmatrons, lasers, sources of glow discharge did not reduce the number of analyzes performed using arcs and sparks. Spark and arc generators remain the most common in production and laboratory practice and their development and improvement remains an urgent task. Ways of development of optical spectral devices and spectrum recording systems are presented.

It is emphasized that in the case of arc and spark sources of spectrum excitation, plasma generation is one of the least controlled links in the chain of devices that implement processes in AES. This is due to the instability of the discharge phenomena in the analytical interval, the instability of the discharge in time and space, depending on the electrical parameters of the discharge, the configuration of the electrodes, their chemical composition and the composition of the atmosphere of the discharge chamber. Therefore, considerable attention is paid to the plasma generator. Namely, the features of circuitry and design of arc pulse plasma generator with digital software control of discharge parameters, which has a wide range of control parameters of plasma excitation depending on the properties of the sample being analyzed and methods of analysis. Comparative tests of the created generator with the industrial generator are carried out.

Ways to improve the optical spectral blocks of multichannel spectrometers for operation in the near infrared, visible and ultraviolet ranges have been developed. Several mock-up variants of optical blocks with a nonclassical diffraction grating and crossed dispersion have been studied. As a result of using a lattice with curvilinear strokes and uneven cutting pitch, the size of the spectrometer is halved while reducing aberrations and improving the optical resolution. Calculations and layout of several optical schemes with crossed dispersion are performed, their advantages in combination with modern matrix sensors are shown.

An optical scheme was designed and a spectroheliograph was made to observe the Sun simultaneously in two lines of the spectrum, which allows to obtain two images of the solar photosphere at different depths at the same time.

Technological, structural and circuit features of optical spectrum recording cameras on multichannel semiconductor photodetectors have been studied. Several spectral chambers with a flexible architecture have been developed and implemented for recording optical spectra in laboratory and industrial conditions, capable of recording the spectrum without interruptions in the range from 190 to 1100 nm, as well as a modification with thermoelectric temperature control of photodetectors. Works on creation of the equipment of registration of hyperspectral images of plasma formations are executed.

On the basis of the manufactured equipment, research has been performed and several methods and techniques have been developed and tested that can significantly expand the capabilities of spectral equipment. Including spectral resolution, dynamic and temperature range. Comparative researches of spectrum sources, optical spectral devices and photodetectors are carried out.

Scientific novelty of the obtained results

- For the first time, a method was developed to increase the resolution of multi-element photodetectors when recording spectra, which is based on improving the spectrometer, which allows micrometric shift of the spectrum image relative to the pixels of detector lines, and the corresponding spectral data processing algorithm. This opens up the possibility of increasing the resolution up to the optical resolution of the spectrometer.
- For the first time, a method of linearization of the light signal function of CCD photodetectors without anti-blooming with the use of parallel registration with counter-transport of charges in CCD detectors has been proposed.
- For the first time a method for determining the temperature of the photodetector by the parameters of the output signal without the use of additional temperature sensors.

- The problem of correct determination of the coordinate and amplitude of the spectral line during registration with a multi-element photodetector is solved. The development of the method of maximum likelihood in relation to the solution of the problem of photometry of spectra is given. The dependence of the accuracy of determining the main parameters of the line on the shape of the spectral line and the signal-to-noise ratio is presented.

- Methods for controlling the nonlinearities of CCD photos have been developed to comply with the principle of reciprocity of line brightness and exposure duration, which allowed to find an explanation for the violation of the law of reciprocity in the case of small levels of exposure.

The practical significance of the obtained results

- The proposed methods of increasing the resolution, dynamic range, determining the temperature of photodetectors and methods of processing experimental data open the way to improve the metrological characteristics of AES equipment in laboratory and industrial practice.

- The proposed method of determining the temperature of the sensor is used in the software of the developed spectral chambers, which allows to use them not only in the laboratory but also in production conditions without the use of auxiliary temperature sensors.

- The created arc generator CUG-2 has high efficiency (efficiency of the generator exceeds 80%), the expanded functional and service opportunities and considerably improved mass and dimensional characteristics. The generator can operate at significant voltage fluctuations in the power supply (from 160 to 250V),

- According to the test results proposed during the design of the generator, the technical solutions provided a threefold reduction in the standard deviation (SCR) of the measurement results, compared with the serial generator UGE-4.

- A spectroheliograph has been developed and manufactured that is capable of obtaining images of the Sun simultaneously in two spectral lines.

The results of research and developed techniques were used in the development of spectrophotometric equipment and algorithms for processing

experimental data. Analytical equipment developed and manufactured with the participation of the author has been implemented in more than two dozen enterprises and laboratories of Ukraine.

Keywords: atomic emission spectral analysis, arc spectrum source, optical spectrometer, CCD photodetector, resolution, dynamic range.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Егоров А. Д., Моторненко А. П., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В., Корж В. Г., Скуратовский И. Г. Автоматизированный спектрометр для эмиссионного спектрального анализа // Радиофизика и электроника. 1999. Т. 4, № 3. С. 148–153. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, участь у дослідженнях спектральних характеристик ПЗЗ ILX526A (Sony)).*
2. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками // Радиофизика и электроника. 2002. Т. 7, № 2. С. 422–425. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної багатоканальної камери на базі КМОН сенсора S5463–1024Q (Hamamatsu), участь у розробці методики вимірювань).*
3. Yegorov A., Yegorov V., Yegorov S. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 1. С. 77–83. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру на базі ПЗЗ сенсора TCD1205D (Toshiba), запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача, приймав участь у визначенні методики вимірювань, та попередньої обробки даних).*
4. Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельников І. Є. Дослідження можливості компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2019. № 5–6. С. 8–15. *(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив декілька модифікацій спектральних камер, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗЗ сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній)*
5. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Экспериментальное исследование газоразрядной антенны на парах ртути с низкочастотным

возбуждением плазмы // Прикладна радіоелектроніка. 2019. Т. 18, № 3–4. С. 190–196. *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях)*

6. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников І. Є. Дуговой генератор плазмы атомно-емісійного аналізатора з цифровим керуванням параметрами розряду // Радіофізика та електроніка. 2020. Т. 25, № 3. С. 78–88. DOI: doi.org /10.15407/rej2020.03.078 *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію генератора плазми, виконав моделювання і макетування джерел розрядного струму.)*

Наукова праця у зарубіжному спеціалізованому виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз :

7. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников спектра атомно-эмиссионных анализаторов. // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 3. С. 410–416. (Scopus, WoS)

(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив багатосенсорну спектральну камеру, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗС сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗС)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на наукових конференціях):

8. Акимов Л. А., Егоров А. Д., Егоров В. А. Проект спектрогелиографа // Солнце и космическая погода: конференция памяти академика Андрея Борисовича Северного, 9–14 июня. 2003 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2004. Т. 100, № 1. С. 233. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, виконав аналіз параметрів фотодетекторів)*

9. Акимов Л. А., Белянкин И. П., Егоров А. Д., Егоров В. А. Еленская Л. И., Здор Е. В., Железняк А. П., Коничек В. В., Корохин В. В.,

Синельников И. Е. Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, розробляв і досліджував спектральну камеру на матричному КМОН фотоприймачі).*

10. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Получение субпиксельного разрешения при регистрации изображений спектров фотодиодными структурами // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 51. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру, запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача).*

11. Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Функциональные и конструкционные материалы : материалы 3-й международной научно-технической конференции НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ, 11–14 ноября 2013 г., Донецк, 2013. С. 85. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, розробив методику вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням).*

12. Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Реконструкция спектров излучения при заданных ограничениях на аппаратную функцию системы регистрации // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике : VIII Всероссийские

Армандовские чтения, 26–28 июня 2018 г., Муром. С. 7–9. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2018/tezis-2018/pdf/T_1.pdf (*Особистий внесок здобувача: брав участь у формулюванні завдань дослідження з урахуванням специфіки вимірювань ПЗЗ сенсорами*)

13. Егоров А. Д., Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Влияние температуры на чувствительность CCD сенсоров фирмы Toshiba TCD1304AP и TCD1304DG. // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 625–629. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_38.pdf (*Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні експериментальної установки та інтерпретації результатів вимірювань*).

14. Егоров С. А., Егоров В. А. Исследование нелинейности чувствительности ПЗС сенсоров TCD1304 и влияющих на нее факторов // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 635–638. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_40.pdf (*Особистий внесок здобувача: запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ*).

15. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Плазменная антенна с парами ртути вида полувибратора Пистолькорса на металлическом экране // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Армандовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 580–587. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_31.pdf (*Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях*)

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації:**

16. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Корж В. Г., Моторненко А. П. Автоматизированный спектрометр на основе спектрографа ИСП-28 // Авиационно-космическая техника и технология. 2000. Вып. 18. С. 235–241. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, брав участь у дослідження спектральних характеристик фотодетекторів)*
17. Егоров В. А., Егоров С. А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр // Наука та інновації. 2008. Т. 4, № 2. С. 33–39. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру з розташуванням сенсорів на колі Роуланда, виконав комп'ютерне моделювання оптичної схеми спектрометра і декількох типів дифракційних ґраток).*
18. Андрющенко А. Ю., Бланк А. Б., Глушкова Л. В., Шевцов Н. И., Штителъман З. В., Егоров А. Д., Егоров В. А., Здор Е. В. О преимуществах фотоэлектрической регистрации атомно-эмиссионных спектров для анализа функциональных материалов и объектов окружающей среды // Методы и объекты химического анализа. 2008. Т. 3, № 2. С. 157–162. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру для спектрографа ДФС-8, брав участь в постановці завдань та інтерпретації результатів вимірювань)*
19. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць. 2014. Вип. 48(2). С. 74–80. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методикау визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, розробив методикау вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням)*

20. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Телескопы видимого и инфракрасного диапазонов для обнаружения экзопланет земного типа // Радиофизика и радиоастрономия. 2016. Т. 21, № 1. С. 14–23. *(Особистий внесок здобувача: оцінив вплив квантових флуктуацій при вимірюваннях світлового потоку в видимому та інфрачервоному діапазонах з застосуванням режиму підрахунку фотонів фотоприймачами різних типів)*.

21. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е., Бабаков М. Ф. Мультисенсорная камера для спектральных измерений на приборах с зарядовой связью линейной структуры // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2019. Т. 90, № 2. С. 80–88. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення мультисенсорної камери для спектральних вимірювань, запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ)*

22. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Удосконалені методики обробки даних в оптичних спектрометрах // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 3, Ч. 1. С. 46–50. *(Особистий внесок здобувача: запропонував табличне задання апаратної функції при обробці спектрів методом максимальної правдоподібності)*

ЗМІСТ

	Стр.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	22
Розділ 1 ЕЛЕМЕНТИ АПАРАТУРИ АЕСА (ОГЛЯД)	33
1.1 Джерела збудження спектру.....	33
1.1.1 Класичні джерела збудження спектру.....	34
1.1.2 Джерела низьковольтної іскри для спектральних досліджень.....	40
1.1.3 Структура і схемотехніка сучасних імпульсних генераторів іскри та дуги	43
1.2 Оптичні прилади АЕСА.....	45
1.2.1 Вимоги до спектральних приладів.....	45
1.2.2 Призмові прилади.....	46
1.2.3 Дифракційні прилади.....	46
1.2.4 Прилади зі схрещеною дисперсією.....	49
1.3 Системи реєстрації спектра.....	50
1.3.1 ПЗЗ фотоприймачі.....	51
1.3.2 Прилади з зарядовою інжекцією ПЗІ.....	55
1.3.3 КМОН фотоприймачі.....	56
Висновки до розділу 1	57
Розділ 2 ДЖЕРЕЛО ПЛАЗМИ З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ	
ПАРАМЕТРАМИ РОЗРЯДУ.....	59
2.1 Принципи побудови генератора ЦУГ-2	59
2.2 Структурна схема і технічні рішення.....	61
2.2.1 Блоки керування і живлення.....	63
2.2.2 Джерело розрядного струму.....	65
2.2.3 Блоки пробною розрядного проміжку, формування розряду і підтримки газового середовища.....	73
2.3 Порівняння розробленого генератора з генератором УГЭ-4.....	76

Висновки до розділу 2.....	79
Розділ 3 ОПТИЧНІ БЛОКИ СПЕКТРОМЕТРІВ	81
3.1 Варіанти побудови оптичних блоків спектрометра.....	81
3.1.1 Спектрографи з увігнутими дифракційними ґратками	82
3.1.2 Спектрографи зі схрещеною дисперсією	87
3.2 Монохроматизація двовимірних зображень об'єктів	96
3.2.1 Оптична схема спектрогеліографа.....	97
3.2.2 Оптична схема спектрографа.....	99
3.2.3 Оптична схема коліматора.....	100
3.2.4 Оптична схема камери спектрографа.....	100
3.3 Отримання субпіксельної роздільної здатності при реєстрації спектрів	102
3.3.1 Розгляд задачі в спектральному викладі.....	103
3.3.2 Розгляд задачі в координатному представленні	107
3.3.3 Експериментальні результати.....	111
Висновки до розділу 3.....	113
Розділ 4 БАГАТОКАНАЛЬНІ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ СПЕКТРІВ	115
4.1 Вимоги щодо камер для реєстрації спектрів.....	116
4.2 Способи узгодження фотоприймачів з оптикою спектрографів.....	118
4.3 Мультисенсорний реєстратор спектра для АЕСА.....	124
4.4 Дослідження темного струму детектора.....	127
4.5 Дослідження нелінійності світлосигнальної передавальної функції сенсора	138
4.6 Дослідження впливу антиблумінгу на динамічний діапазон сенсорів	142
4.7 Випробування реєструючої камери з різними джерелами світла.....	144
Висновки до розділу 4	147
Розділ 5 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПЕКТРАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	149
5.1 Загальна спектрометрична постановка задачі.....	149
5.2 Аналітичний параметр.....	150

5.3 Прямокутне ядро згладжування і нормальний розподіл яскравості в лінії.....	153
5.4 Обробка результатів вимірювань методом максимальної правдоподібності при лінійній світлосигнальній передавальній характеристиці реєстратора.....	157
5.5 Лінеаризація світлосигнальної передавальної функції ПЗЗ детектора при великих сигналах.....	160
Висновки до розділу 5.....	164
ВИСНОВКИ.....	165
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	188
ДОДАТОК Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	194
ДОДАТОК В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	195
ДОДАТОК Г. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	196

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	Аналого–цифровий перетворювач
АЕСА	Атомно–емісійний спектральний аналіз
ВЧ	Високі частоти
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КМОН	Комплементарна структура метал – оксид – напівпровідник
МДН	Метал – діелектрик – напівпровідник
МОН	Метал – оксид – напівпровідник
НВЧ	Надвисокі частоти
ПЗЗ	Прилади з зарядовим зв’язком
ПЗІ	Прилади з зарядовою інжекцією
ПЛМ	Програмована логічна матриця
СЗ	Стандартний зразок
СКВ	Середньоквадратичне відхилення
ЦАП	Цифро–аналоговий перетворювач

ВСТУП

Відкритий понад 100 років тому метод атомно-емісійного спектрального аналізу (АЕСА) залишається одним з найбільш поширених методів елементного аналізу завдяки високій чутливості, багатокомпонентності та експресності. На цей час понад 80% експрес-аналізів у світі здійснюється за допомогою АЕСА. Цей метод є основним при вхідному і вихідному контролі сировини та продукції в таких галузях, як чорна і кольорова металургія, гірничодобувна, збагачувальна і переробна промисловість, виробництво особливо чистих матеріалів, екологічний контроль у харчовій промисловості, переробка відходів ядерної енергетики [1].

Відкриття спектрального аналізу було підготовлено класичними дослідженнями Ньютона, Волластона, Фраунгофера та інших вчених. Роком народження АЕСА вважається 1859 рік, коли німецький фізик Кірхгоф і хімік Бунзен опублікували спільну роботу з виявлення лужних металів за допомогою спектроскопа і встановили, що атоми поглинають ті ж самі довжини хвиль, що і випромінюють, і що кожному хімічному елементу належить свій, характерний для нього, і тільки для нього, лінійчатий спектр. Ця обставина і лягла в основу спектрального аналізу. [2,3].

До 1923 р. АЕСА мав, головним чином, якісний характер і зіграв важливу роль у відкритті нових елементів. Методами АЕСА було відкрито 25 елементів періодичної системи [3].

Величезну роль АЕСА зіграв у розвитку астрономії, починаючи з відкриття гелію на Сонці в 1868 р. і, закінчуючи відкриттям космологічного червоного зміщення далеких об'єктів у Всесвіті. Нині, в астрономії, АЕСА грає монопольну роль і не може бути замінений ніякими іншими методами аналізу [2,3].

У чисто виробничій практиці спектральний аналіз почав використовуватися в 1923 р. в Англії для сортування призначеного до

переплавляння металевого брухту, при цьому застосовувався спектроскоп з дифракційною ґраткою [2,3].

Початком спектроскопії в її сучасному вигляді можна вважати роботу Ландергарда 1928 р. Він використовував полум'я ацетилен-повітря і пневматичний розпилювач і зміг побудувати градувальні графіки для кількісного аналізу. Перший комерційно доступний полум'яний емісійний спектрометр був випущений Сименсом і Цейсом в середині 1930-х. Полум'яна фотометрія застосовується і зараз, хоча з початку 1960-х широко використовують нові джерела випромінювання, такі, як плазма з електричним живленням. Ранні дослідження іскри й дуги були виконані Уїтстоном в 1834 р. Приблизно в 1850 р. іскру стали отримувати, використовуючи індукційну котушку Румкорфа. Дуговий та іскровий розряди для емісійної спектроскопії застосовували з 1920-х; з їх допомогою стало можливим визначати більшість елементів періодичної таблиці у твердій пробі. Детектування проводили за допомогою фотопластинок, а пізніше їх замінили фотопомножувачами. Комерційно доступні прилади вперше були випущені в кінці Другої світової війни, а перший сучасний спектрометр прямої реєстрації був випущений в кінці 1940-х [4]. Як і на цей час, спектрометр містив у своєму складі наступні блоки: генератор плазми, оптичний дисперсійний блок і систему реєстрації спектрів. Ці три основних компоненти належать до різних галузей знань і, з одного боку, розвиваються та удосконалюються самостійно відповідно до логіки розвитку відповідних галузей. Але, з іншого боку, спектроскопія ставить все нові завдання, чим стимулює прогрес в цих суміжних областях. З цієї причини для спектрального аналізу весь час існує можливість зрівнювання побажань користувачів і їх апаратурної реалізації.

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Технічний прогрес в металургії, металообробці, а також в геології та екологічних службах з кожним роком підвищує вимоги до точності й чутливості елементного аналізу. Разом з тим, досягнення в дослідженні

плазми, оптиці, електроніці та обчислювальній техніці відкривають нові можливості вдосконалення апаратури та методів спектрального аналізу речовини.

Атомно-емісійний спектральний аналіз – це сукупність методів елементного аналізу, заснованих на вивченні спектрів випромінювання вільних атомів і іонів у газовій фазі [5]. Для проведення атомно-емісійного спектрального аналізу речовини необхідно виконати наступний ланцюжок послідовних операцій: здійснити пробовідбір необхідної кількості зразка, розігріти його до переходу в стан плазми, здійснити спектральний аналіз випромінювання одержаного плазмового утворення і виміряти аналітичні параметри спектра.

За результатами вимірювань аналітичних параметрів, використовуючи калібрувальні апріорні дані, робиться висновок про елементний склад досліджуваного зразка.

Для забезпечення повторюваності та однорідності вимірювань на всіх етапах аналізу необхідно здійснювати контроль і керування режимами роботи всіх ланок ланцюжка блоків. Для цього необхідно встановити вид функціональної залежності між вхідними керуючими сигналами та вихідними параметрами кожного блоку, якщо вони існують. Такі функції можуть бути багатопараметричними й неоднозначними, мати гістерезисні властивості та залежать від тривалості впливу різних чинників.

Аналізовані плазмові утворення, як правило, нестаціонарні в часі та неоднорідні в просторі. Тому керівні й стабілізуючі зворотні зв'язки повинні формуватися досить швидкодіючими логічними та електричними контурами керування. Крім того, всі блоки можуть бути чутливими до неконтрольованих зовнішніх впливів і внутрішніх шумів, які спотворюють результати вимірювань. З цих причин в багатопараметричному просторі результатів вимірювань, будемо мати не крапку, а розміту пляму, розміри якої збільшуються зі зменшенням точності аналізу. Для мінімізації загальної помилки вимірювань необхідно мінімізувати кожен її компоненту

вдосконаленням всіх блоків апаратури окремо (генератора плазми, оптики, електронних блоків) і оптимізувати їх взаємодію в цілому. Сучасна елементна база електронних приладів, комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, дозволяє вирішувати в режимі реального часу задачу мінімізації помилки аналізу з керуванням по всій сукупності параметрів.

Треба зазначити, що виробництво спектральної апаратури АЕСА, за часів СРСР, було зосереджено у Ленінграді, Москві та Казані. В Україні, після розпаду СРСР, була відсутня наукова школа, обладнання та потужності з виробництва апаратури АЕСА. Тому створення наукових засад і методів АЕСА, та розробка сучасної спектральної апаратури, зважаючи на потребу її використання у металургійній, гірничій та металообробній галузях, є актуальним завданням.

Ці міркування лягли в основу досліджень з фізики та техніки АЕСА на засадах яких автором було, розроблено декілька комплектів приладів, що складаються з генераторів плазми, оптичних блоків аналізаторів спектра і спектральних реєструючих камер, а також способів їх удосконалення та застосування, на яких базується апаратура атомно-емісійного спектрального аналізу, представлена в дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дана робота виконана у відділі радіофізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я.Усикова НАН України в рамках досліджень, що проводилися при виконанні держбюджетних НДР: «Розвиток нових методів та засобів радіоінтроскопії в середовищі з дисипативними та диспергуючими властивостями» (шифр «Стриж-4») 2003 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0100U006571); «Розвиток методів и засобів радіофізичної інтроскопії» (шифр «Стриж-5») 2006 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0103U002265); «Методи та засоби радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ» (шифр «Омега») 2007 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0107U001083); «Розвиток методів та вдосконалення засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та

штучного походження» (Шифр «Омега-2») 2012 р. (номер держ. Реєстрації № ГР0111U010474); «Розвиток методів та засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та штучного походження» (шифр «Омега-3») 2017 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0117U004035); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика-2») 2018 р. (номер держ. Реєстрації 0118U003035). Автор був одним з відповідальних виконавців цих НДР і його науковий внесок в них відображено в дисертації. Паралельно з цими роботами автор був відповідальним виконавцем таких науково-технічних проєктів по спектроскопічним дослідженням плазми: два проєкти Українського Науково-Технічного Центру (УНТЦ) – «Створення портативного квантометра» (№143) і «Спектрогеліографа для оперативної реєстрації активності Сонця (СОРАС) в різних лініях спектра» (№Uzb-54 (J)), а також інноваційного проєкту Президії НАН України «Організація малосерійного виробництва автоматизованого спектрометра для емісійного спектрального аналізу» (шифр «Спектрометр») 2006 р. (номер держ. реєстрації № ГР 0106U009670).

Мета й задачі досліджень.

Метою даної роботи є виявлення фізичних закономірностей процесів збудження, аналізу та реєстрації спектрів плазмових утворень в апаратурі АЕСА, та використання цих закономірностей для удосконалення метрологічних і експлуатаційних характеристик аналітичної апаратури.

Для досягнення цієї мети треба було розв'язати наступні задачі:

1. Розробити способи формування та ініціації розрядного струму дугового генератора з програмним керуванням параметрами розряду для контролю режимів пробовідбору та збудження плазми.

2. Дослідити шляхи удосконалення оптичних спектральних блоків багатоканальних спектрометрів для роботи в ближньому інфрачервоному, видимому та ультрафіолетовому діапазонах.

3. Дослідити можливості використання багатоканальних фотоприймачів для реєстрації спектрів. Розробити та виготовити камери реєстрації спектрів з можливістю безрозривної реєстрації заданої ділянки спектру у широкому спектральному діапазоні (без пропусків), та з програмним керуванням температурою фотоприймачів.

4. Розробити технічні засоби та методи підвищення роздільної здатності багатoelementних фотоприймачів.

5. Виконати роботи по дослідженню динамічного діапазону багатоканальних фотодетекторів та розробити методи його розширення.

6. Дослідити можливість реєстрації гіперспектральних зображень плазмових утворень.

7. Розробити алгоритм оптимальної фільтрації результатів спектральних вимірювань.

8. Провести тестування розробленої апаратури та методик в лабораторних умовах і реальних умовах промислового виробництва.

Об'єкт досліджень – процес атомно-емісійного аналізу елементного складу речовини та способи підвищення його апаратної та аналітичної точності.

Предмет досліджень – розробка і впровадження удосконалених методів і апаратури генерації плазми та реєстрації атомно-емісійних спектрів.

Методи дослідження, які використовуються в роботі, базуються на загальній теорії атомно-емісійного спектрального аналізу. Розроблені елементи спектральних приладів, базуються на теоретичних основах побудови імпульсних джерел живлення, стійкості систем зі зворотним зв'язком, принципах побудови електронних приладів, теоретичних методах розрахунку та комп'ютерному й експериментальному моделюванні оптичних приладів. Визначення температури напівпровідникових сенсорів базується на

досліджені статистичних характеристик вихідного сигналу. Способи визначення лінійності фоточутливих сенсорів з застосуванням принципу взаємозамінності, що базуються на законах Бунзена-Роско та Шварцшильда, з використанням методів найменших квадратів і максимальної правдоподібності для обробки результатів й розширення динамічного діапазону при вимірюванні аналітичних параметрів спектральних ліній.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Вперше розроблено спосіб підвищення роздільної здатності багатoelementних фотоприймачів для спектральних досліджень із застосуванням зміщення спектру на частину пікселя, що дозволяє підвищити її аж до оптичної роздільної здатності спектрометра – незалежно від розмірів пікселів фотоприймача, експериментально отримана роздільна здатність 7 мкм, що у два рази менше ніж розмір пікселя фотоприймача – 14 мкм.

2. Вперше розроблена і впроваджена методика вимірювання темного струму багатоканальних фотодетекторів, яка заснована на вимірюванні параметрів вихідного сигналу фотоприймача без застосування допоміжних сенсорів температури, що дозволяє суттєво зменшити вплив температури на точність фотометрування, експериментально отримана точність визначення температури фотоприймача краще ніж 1°C.

3. Вперше запропонована лінеаризація передавальної світлосигнальної функції фоточутливих приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), що не мають антиблумінгу, із застосуванням одночасної реєстрації на два сенсори з протилежними напрямками транспортування зарядів у зсувних регістрах, що дозволило більш ніж у десять разів збільшити динамічний діапазон фотоприймачів.

4. Удосконалено схемотехніку формування розрядного струму дугового генератора збудження спектру з підвищеною стабільністю та швидкодією, що дає змогу розширити діапазон енергій збуджуваних спектральних ліній, і отримати точність вимірювань, що перевищує точність серійного генератора УГЭ-4, в три рази.

5. Отримали подальший розвиток методи контролю нелінійностей трактів накопичення та перенесення заряду фотоприймачів по виконанню принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції, що дозволило знайти пояснення порушенню закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ.

6. На основі спроектованої оптичної схеми виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра, що дозволяє одержувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

Практичне значення отриманих результатів

Проведені дослідження та впроваджені способи удосконалення метрологічних та експлуатаційних характеристик стали базою розробки ряду спектральних приладів, що не поступаються кращим світовим зразкам і були успішно впроваджені на ряді підприємств металургійної та металообробної галузі України.

– Розроблено, спроектовано і виготовлено кілька варіантів спектроскопічних камер які використовуються разом з серійними спектрографами ИСП-30, ИСП-28, ДФС-452, ДФС-8, ИСП-51 що дозволило замінити на цьому обладнанні фотографічну реєстрацію спектрів на електронну. Це дало змогу значно, з 30 хвилин до 1–2 хвилин, скоротити терміни виконання аналізів, виключити процес обробки фотоматеріалів, комп'ютеризувати процес виконання аналізів. Збільшити точність і експресність виконання робіт. Апаратура реєстрації спектрів впроваджена більш ніж на 20 підприємствах України.

– Розроблені методики визначення температури сенсорів використані в програмному забезпеченні спектрального аналізу, що значно зменшило вплив температури на результати аналізу.

– Розроблений і виготовлений дуговий генератор «ЦУГ-2» впроваджено на декількох підприємствах України, що дозволило в порівнянні з серійним генератором «УГЭ-4» скоротити енергоспоживання на

60%, збільшити точність аналізів в середньому у 3 рази, і розширило діапазон вимірюваних концентрацій.

Автор був відповідальним виконавцем таких госпрозрахункових та науково-технічних договорів: НДОКР «Модернізація стилоскопа «Спектр» (шифр «Бона»), Приватне підприємство фірма «БОНА» (дог. № 02/07, 2007 р.); НДР «Модернізація блоку генерації плазми» (шифр «ХЕЛЗ»), ПАТ Харківський електротехнічний завод «ХЕЛЗ Укрелектромаш» (дог. № 9/10, 2010 р.); НТП «Розробка системи керування генератора плазми і модернізація електродного вузла спектрографа ИСП-28» (шифр «Жовтень»), ПАТ завод «Червоний Жовтень», м. Харків (дог. № 20/11, 2011 р.); «Створення електронної системи реєстрації атомно-емісійних спектрів для спектрографа ИСП-30» ДП «Завод ім. В. О. Малишева» Укроборонпром, м. Харків (дог. № 11/14–1102дп, 2015 р.). Крім того, автор брав безпосередню участь в проєктуванні, розробці і виготовленні блоків спектральної апаратури яка постачалась виробничі підприємства і дослідні та навчальні установи України. Розроблена і виготовлена автором апаратура і методики використовуються на цих підприємствах і установах для контролю вхідної сировини, технологічних процесів виробництва, готової продукції, а також в дослідній та навчальній практиці.

Особистий внесок здобувача

Автор безпосередньо брав участь в розробці методів дослідження, створення та налаштування вимірювальних методик, проєктуванні, розробці, виготовленні та модернізації апаратури й програмно-апаратних засобів. Він особисто брав участь у проведенні експериментів, поясненні отриманих експериментальних результатів і їх фізичній інтерпретації.

У дисертаційній роботі представлені узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень з розробки наукових засад та вдосконалення апаратури та методів атомно-емісійного аналізу речовини.

Дослідження проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України впродовж ряду (1995–2020 р.р.) років особисто здобувачем і в співавторстві.

При опублікуванні наукових праць здобувач брав участь у постановці задач, розробці проєктуванні та виготовленні апаратури реєстрації спектрів [6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26], оптичних спектральних приладів [8, 13, 14, 15, 22], дугового генератора плазми [11]. Експериментальних дослідженнях температурних властивостей ПЗЗ сенсорів [12, 16, 18, 19, 24, 26], дослідженнях амплітудних характеристик багатоеlementних фотоприймачів [9, 12, 19, 26], в обробці й інтерпретації результатів вимірювань, в розробці методики проведення вимірювань, і написанні окремих розділів статей і тез [8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

Апробація матеріалів дисертації

Наукові результати та основні положення роботи доповідалися і обговорювалися на семінарах ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України, а також на міжнародних конференціях:

- міжнародна конференція «Солнце и космическая погода», Кримська астрофізична обсерваторія, Крим, 2003 р.;
- міжнародна конференція «Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности», Кримська астрофізична обсерваторія, Крим, 2007 р.;
- 3 міжнародна науково-технічна конференція «Функціональні і конструкційні матеріали», НТЦ «Реактивелектрон» НАНУ, Донецьк, 2013 р.;
- VIII Всероссийские Арmandовские чтения. МИ ВлГУ, «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике», Муром, 2018 г.;
- Всероссийские Арmandовские чтения. МИ ВлГУ, «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн», Муром, 2019 г.

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 22 наукових працях, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у зарубіжному спеціалізованому виданні, що входить до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science; 8 наукових працях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, та 7 статей, що додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Обсяг основного тексту 146 сторінок, повний обсяг становить 197 сторінок. Дисертація містить 70 рисунків і 6 таблиць. Список використаних джерел містить 204 найменування.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕМЕНТИ АПАРАТУРИ АЕСА (ОГЛЯД)

Апаратура АЕСА, як правило, складається з наступних елементів:

- джерела збудження спектру;
- оптичного спектрального приладу;
- системи реєстрації спектра;
- системи обробки спектральних даних.

Кожен з цих елементів зазнавав неодноразових удосконалень в історії розвитку методу, чим і пояснюється різноманітність апаратури АЕСА представленої на ринку і в дослідницьких лабораторіях.

1.1 Джерела збудження спектру

Точність атомно-емісійного спектрального аналізу залежить від характеристик всіх блоків, що входять до складу спектрометра, але, в першу чергу, від параметрів джерела збудження спектру. У джерелі збудження спектру речовина, що аналізується, переводиться в газоподібний стан атомізується та іонізується, – переводиться в стан плазми. За рахунок зовнішніх джерел енергії атоми та іони в плазмі переводяться в збуджений стан, випромінюючи при цьому лінійчатий спектр характерний для кожного з елементів. При цьому джерела збудження повинні забезпечити отримання великих і по можливості постійних інтенсивностей випромінювання спектральних ліній досліджуваних елементів [2].

Чутливість і точність АЕСА залежать головним чином від фізичних характеристик джерел збудження спектрів – температури, концентрації електронів, часу перебування атомів у зоні збудження спектрів, стабільності режиму джерела і т. д. Для розв'язання аналітичної задачі необхідно вибрати відповідне джерело випромінювання, домогтися оптимізації його характеристик за допомогою різних способів – використання інертної

атмосфери, накладення магнітного поля, введення спеціальних речовин, що стабілізують температуру розряду, ступінь іонізації атомів, дифузійні процеси на оптимальному рівні й т.і. [27]. У практиці атомно-емісійного спектрального аналізу в якості джерел збудження спектрів застосовують полум'я, електричні дуги постійного і змінного струму, низько і високовольтну конденсовану іскру, низьковольтний імпульсний розряд, різні форми тліючого газового розряду та ін. За останні 10–15 років широкого поширення набули різні види високочастотних розрядів: високочастотна індуктивно-зв'язана плазма (ІЗП) в атмосфері інертних газів при атмосферному тиску, надвисокочастотний (НВЧ) розряд і ін. [29]. Попри появу останнім часом великої кількості приладів з новими методами збудження спектру іскрові й дугові джерела не втратили свого значення і залишаються одними з найпоширеніших у практиці АЕСА [29, 30, 31]. Це пояснюється невисокою вартістю – як початковою, так і подальшого обслуговування, простотою, високою чутливістю і прийнятною відтворюваністю результатів аналізу.

Дугові джерела збудження, як правило, використовуються для визначення низьких (слідових) концентрацій, завдяки високій чутливості та тому, що вони збуджують, в основному, спектральні лінії, які мають низькі потенціали збудження. При використанні високовольтної іскри збуджуються лінії з високим потенціалом збудження, що характеризуються меншою чутливістю, але забезпечують кращу точність і широкий діапазон лінійності градуовальних залежностей [32]. У багатьох випадках необхідно використовувати обидва джерела для проведення аналізу у всьому діапазоні концентрацій.

1.1.1 Класичні джерела збудження спектру

Починаючи з 50-х років минулого століття в СРСР було налагоджено масове виробництво іскрових і дугових генераторів виконаних за «класичними» схемами (серія ИГ-1, ИГ-2, ИГ-3, ИВС-23 – іскрові, ДГ-1, ДГ-2, ДГ-3, ИВС-28, ИВС-29 – дугові) [3, 33, 34]. Деякі з цих джерел до

цього часу використовуються на виробництві. Генератори типу ИГ і ДГ, формують неконтрольований пробій, використовуючи повітряні розрядники, параметри яких залежать від стану атмосфери та вимагають періодичного обслуговування, що є основною причиною нестабільності розряду. Найбільш досконалий, з тих що випускалися в СРСР, генераторів УГЭ-4, мав схему керування на вакуумних лампах і схему ініціації на газорозрядному тиратроні, що також має обмежений термін служби [35].

Як відомо, плазма дугового розряду в газі має негативний диференціальний опір [35]. При збільшенні струму напруга на електродах падає і навпаки (Рис. 1.1).

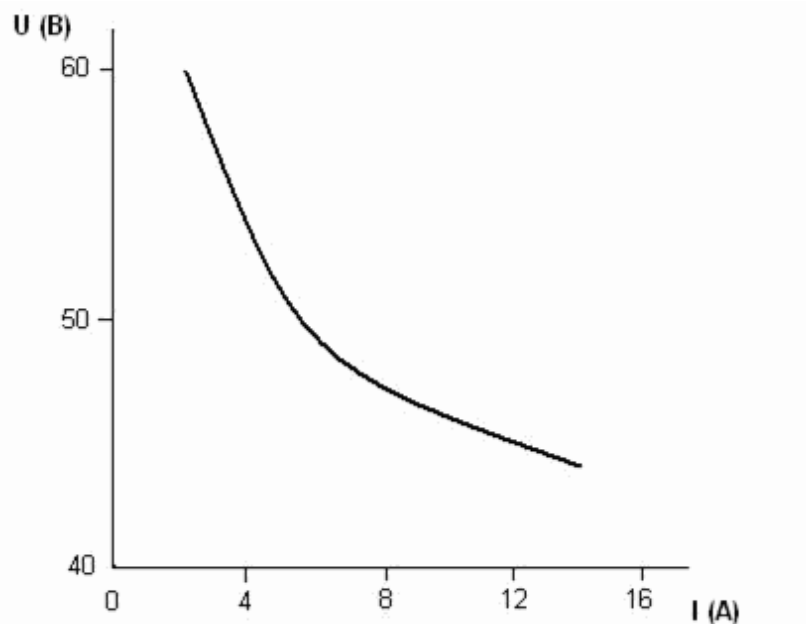


Рис. 1.1 Вольт-амперна характеристика атмосферної дуги між вугільними електродами. Початкова міжелектродна відстань 2 мм [37]

Таким чином, дуговий розряд – нестійка система, випадкове зниження струму в якій викликає підвищення напруги, тобто збільшення опору, що призводить до ще більшого зменшення струму, і так до повного згасання розряду. Для забезпечення стабільності такого розряду в електричне коло вводять так званий баластний резистор, величина якого багато більше опору дуги. Цей спосіб стабілізації дугового струму понад сто років застосовувався

в дугових генераторах [32]. В такій схемі струм визначається головним чином величиною напруги джерела живлення і баластним резистором і слабо залежить від опору розрядного проміжку. Умови стабільності розряду в такій схемі входять в суперечність з ККД приладу. Типова споживана потужність при силі струму в дузі 10А досягає 2,5 кВт, при цьому безпосередньо в розряд надходить тільки 300–500 Вт., тобто ККД таких генераторів складає 12–20% [34, 35]. Крім того, у виробничих умовах, стабільна мережа живлення швидше рідкісний виняток із правил, що впливає на стабільність струму в дузі. «Класичні» схеми, реалізовані в генераторах УГЭ-4, ИВС-29 і ін., наведені на Рис. 1.2 і 1.4.

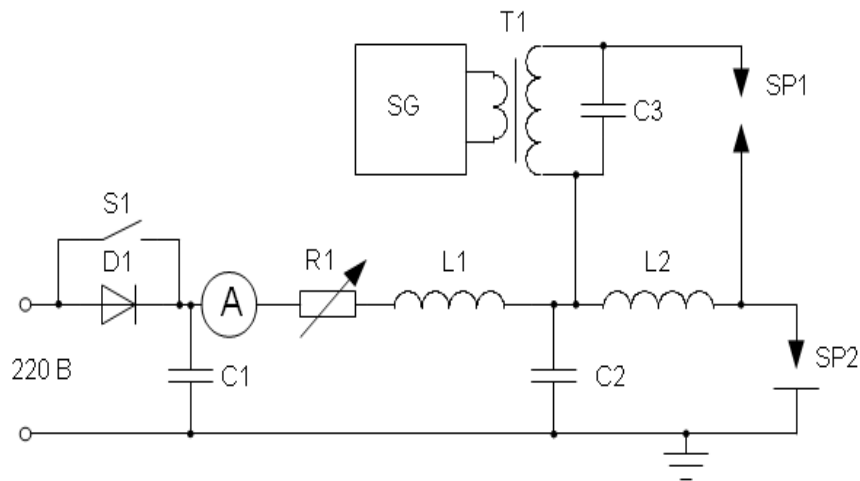


Рис. 1.2 Принципова схема генераторів «Дуга постійного / змінного струму»: S1 – перемикач постійний/змінний струм; A – амперметр; R1 – баластний резистор, що обмежує струм дуги; C1 L1 C2 – низькочастотний фільтр; L2 – високовольтний дросель; SG1 – генератор імпульсів запалювання; C3 – високовольтний конденсатор; T1 – підвищуючий високовольтний трансформатор; SP1 – ініціюючий повітряний розрядник; SP2 – аналітичний проміжок [38]

Форма вихідного струму в «класичних» схемах дуги змінного струму не є синусоїдальною, а являє собою імпульси складної форми, що залежить від параметрів мережі живлення, стану іскрових розрядників і атмосферних умов. Заповнення часу експозиції струмом залежить від фази підпалу розряду і складає не більше 50% (Рис. 1.3).

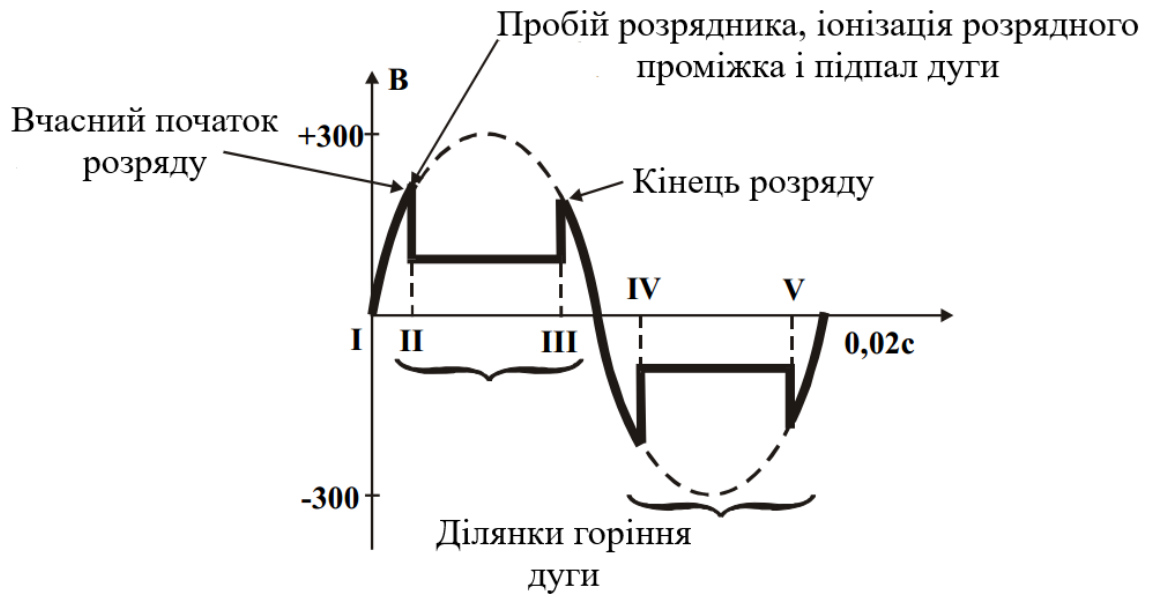


Рис. 1.3 Форма напруги на електродах при горінні дуги змінного струму [39]

У «класичних» іскрових схемах (Рис.1.4) струм зарядки конденсаторів обмежується потужними резисторами.

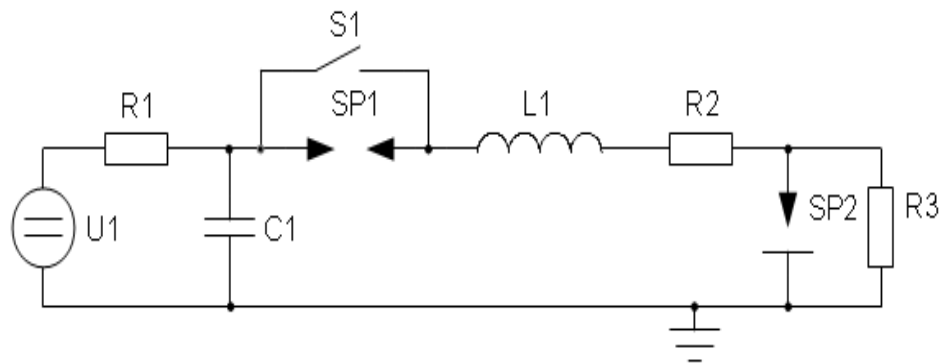


Рис. 1.4 Принципова схема генератора «Високовольтна іскра»: U_1 – регульоване джерело напруги 8–15кВ, R_1 – резистор, що обмежує струм зарядки конденсатора, C_1 L_1 R_2 – розрядний контур, SP_1 – допоміжний повітряний розрядник, SP_2 – аналітичний проміжок, R_3 – шунтуючий резистор [40]

При протіканні через резистор заряду $Q = C_1 U_1$ виділяється теплова енергія E [40]:

$$E = \frac{U_1^2}{R_1} \int (e^{-t/R_1 C_1})^2 dt = \frac{C_1 U_1^2}{2}, \quad (1.1)$$

рівна енергії заряду конденсатора C_1 . Тому ККД «класичних» іскрових генераторів не перевищує 50%.

У разі «простої» схеми, вимикач S1 замкнутий, накопичена конденсатором до моменту розряду енергія залежить від електричної міцності міжелектродного проміжку (відстані між електродами, якості поверхні, іонізації повітря і ін.). Розряд в такій схемі є некерованим [33].

У разі використання допоміжного розрядника (схема С. М. Райського), істотно поліпшується стабільність імпульсів струму високовольтного іскрового розряду [41, 42]. Але, коли в контур послідовно включені допоміжний і аналітичний міжелектродні проміжки, сумарні втрати становлять вже понад 75%.

Форма струму іскрового розряду визначається параметрами CLR контуру і може мати коливальний (якщо $RC / (L / R) < 4$) або аперіодичний (якщо $RC / (L / R) > 4$) характер (Рис.1.5).

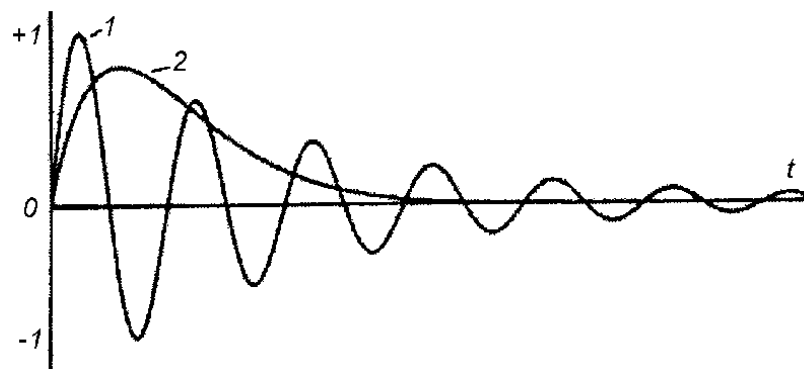


Рис. 1.5 Типовий вид іскрового розрядного струму: 1 – коливальний режим розряду; 2 – аперіодичний режим розряду [40]

Струм коливального розряду є загасаючою синусоїдою з півперіодом $\tau \approx \pi \sqrt{L / C}$. Максимальна сила струму визначається як [40]:

$$I_{\max} = \frac{U}{\sqrt{L/C + R}}. \quad (1.2)$$

Всі «класичні» генератори укомплектовані штативами, розряд в яких відбувається в повітряній атмосфері, що обмежує спектральний діапазон.

Випромінювання з довжиною хвилі нижче 190нм поглинається киснем і не може бути зареєстровано в повітряній атмосфері [43]. У разі аналізу сталей дуже складно визначати вуглець (довжина хвилі 193нм), де коефіцієнт поглинання складає більше ніж 50%. У повітряній атмосфері неможливо визначати фосфор і сірку, аналітичні спектральні лінії яких знаходяться в діапазоні вакуумного ультрафіолету.

Крім того, до недоліків «класичних» генераторів слід віднести:

- Форма струму розряду визначається ручною установкою параметрів елементів розрядного контуру і не може бути змінена в процесі дослідження. Для зміни режимів роботи генератора потрібно вимкнути його, щоб вручну перекомутувати R, C, L елементи. Ручна комутація режимів генератора і повітряний штатив не дозволяють застосовувати метод попереднього високоенергетичного обіскрювання проби.[44, 45, 46].
- Зміни напруги в мережі живлення, що часто трапляються в умовах великого виробництва, призводять до нестабільності струму розряду.
- Для стабілізації розряду використовуються баластні реостати, повітряне охолодження яких створює значний рівень шуму в приміщеннях і призводить до неефективного витрачання електроенергії.
- Стабільність розрядного струму визначається параметрами повітряних розрядників, які залежать від стану навколишньої атмосфери, вимагають постійного обслуговування, а також мають обмежений ресурс роботи. Для поліпшення параметрів розряду в генераторі УГЭ-4 використовується керований водневий тиратрон, що має обмежений термін служби [35].
- За допомогою LRC контуру неможливо сформувати імпульси струму бажаної форми й полярності та забезпечити необхідне чергування цих імпульсів. При цьому форма струму розряду визначає такий параметр плазми як співвідношення «іскрових» і «дугових» ліній в спектрі, а полярність струму розряду впливає на процес надходження речовини в аналізований проміжок. Таким чином, при роботі з «класичними» генераторами користувач

позбавлений можливості оперативно і в широких межах керувати фізичними процесами в розряді.

- Іскрові розрядники створюють високий рівень електромагнітних завад, що впливає на працездатність вимірювального і комп'ютерного обладнання, що знаходиться поруч.

Спроби виправити ці недоліки робилися в межах можливостей техніки свого часу, так для стабілізації струму дуги застосовувалися індуктивні баласти й магнітні підсилювачі, трансформатори з великим полем розсіювання, що мають круто падаючу навантажувальну характеристику і спеціальні типи випрямлячів, а також схеми уніполярної високовольтної іскри [47, 48, 49, 50]. Для стабілізації моменту розряду в схемах високовольтної іскри була розроблена схема з обертовим механічним переривником, що приводиться в рух синхронним електродвигуном, – схема Фейсснера [41, 32], і схема з потужним газорозрядним тиратроном [51, 52]. Незважаючи на те, що ці удосконалення давали позитивний ефект, поширення вони не отримали через істотне ускладнення приладів і ненадійність механічних переривників [32, 52]. Перевагою «класичних» генераторів є те, що під ці спектральні джерела створена велика кількість стандартизованих аналітичних методик.

1.1.2 Джерела низьковольтної іскри для спектральних досліджень

З появою вакуумних квантометрів, які реєструють спектральні лінії в діапазоні вакуумного ультрафіолету були створені генератори та штативи, що продуваються аргоном, для роботи в цьому діапазоні довжин хвиль. Крім прозорості в діапазоні вакуумного ультрафіолету в контрольованому аргоновому середовищі відсутні явища окислення електродів і відсутні молекулярні смуги в спектрі, що маскують значні ділянки спектра. Це дозволяє використовувати маловитратні електроди (зазвичай вольфрамові), що покращує збіжність і відтворюваність аналізів і розширює діапазон градуювальних графіків. Відповідно до кривих Пашена [53] електрична міцність аргонowego середовища приблизно в п'ять разів нижче електричної

міцності повітря, тому високовольтна іскра не використовується в атмосфері аргону. Водночас дуга не забезпечує збудження іонних ліній таких елементів як вуглець сірка і фосфор. Завдання ефективного збудження спектру для аргонозаповнених штативів була вирішена з розробкою генераторів низьковольтної іскри. На Рис. 1.6 представлена спрощена схема іскрового генератора, що використовується спільно з вакуумним квантометром ДФС-41.

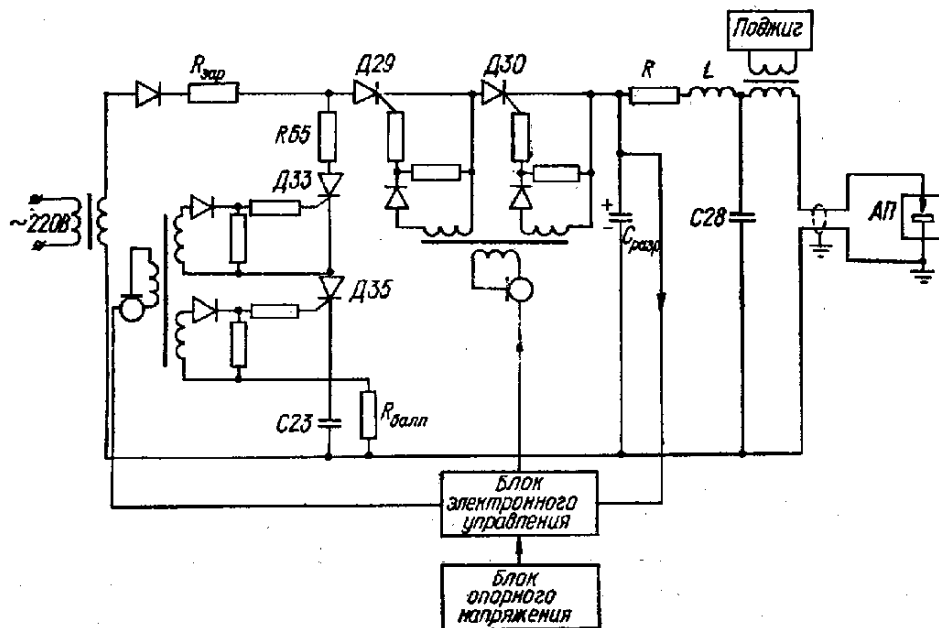


Рис. 1.6 Спрощена схема іскрового генератора ИВС-1 [54]

При варіації параметрів контуру низьковольтної іскри (ємності C індуктивності L і опору R) можна отримати різні режими розряду: від коливального ($CR^2 / 4L < 1$) до критичного ($CR^2 / 4L \approx 1$) і аперіодичного ($CR^2 / 4L > 1$). Напруга на конденсаторах розрядного контуру в залежності від типів генераторів зазвичай становить 450 – 1000 В [55]. При такій напрузі не відбувається неконтрольованого пробоя розрядного проміжку в аргонівому середовищі. В якості силових ключів в даному генераторі використані потужні тиристори, як єдино доступні силові напівпровідникові компоненти на момент розробки приладу. Генератор створює стабілізовану напругу на конденсаторах $750 \text{ В} \pm 0,5\%$, величина ємності дискретно регулюється (8, 16,

24, 32, 40 мкФ), індуктивність контуру також варіюється (0, 10, 40, 60, 120, 180, 250 і 500 мкГ), а опір можна міняти в межах 0,1 – 16,9 Ом. Підпал основного розряду здійснюється за допомогою високовольтної іскри малої енергії, що ініціюється в аналітичному проміжку спеціальною електронною схемою [54, 55]. Живлення розрядного RCL контуру здійснюється від однофазної мережі змінного струму через підвищувальний трансформатор і однополуперіодний випрямляч. У позитивному півперіоді мережі живлення відбувається заряд конденсатора розрядного контуру, а в другому півперіоді здійснюється розрядний процес. У джерелі застосований амплітудно-фазовий метод керування напругою живлення розрядного контуру і моментом розряду. Стабілізація амплітуди робочої напруги на конденсаторі здійснюється за допомогою компаратора і швидкодіючого переривника зарядного струму, що відключає джерело живлення від розрядного струму при досягненні на конденсаторах контуру заданої напруги. Підпал розряду відбувається при відключеному джерелі живлення [54, 55]. За рахунок того, що включення зарядного струму відбувається в моменти переходу мережевої напруги через нуль забезпечується високий ККД заряду конденсаторів, але в той же час використання однополуперіодного випрямляча і заряду з відсіченням зарядного струму призводять до низького коефіцієнта використання мережі живлення. Основна складність тиристорних інверторів полягає в тому, що тиристор неможливо вимкнути, знизивши до нуля струм керування, для цього необхідно знизити до нуля анодну напругу. Труднощі із забезпеченням надійного відключення тиристорних ключів пояснюють низьку максимальну робочу частоту генератора, прив'язану до частоти мережі 50Гц. У генераторі використовувалася ручна комутація режимів за допомогою перемикачів і перемичок [54].

Більш досконалу резонансну тиристорну схему мали генератори спектрометрів POLYVAC E2000 [56], Spectro Lab [57]. Резонансна схема з індуктивним обмеженням зарядного струму з високим ККД і схема керування на дискретних цифрових логічних мікросхемах дозволила підняти частоту

імпульсів в розрядному контурі до 600Гц [57]. До недоліків цих схем можна віднести:

- наявність потужного низькочастотного силового мережевого трансформатора;
- механічну комутацію ланцюгів розрядного контуру;
- використання, в схемі підпалу-ініціації, іскрового розрядника, що вимагає періодичного обслуговування;
- високий рівень перешкод від іскрового розрядника;
- складність і ненадійність тиристорних схем.

Попри зазначені недоліки ці прилади були досить досконалими, для свого часу, і за рахунок зміни параметрів розрядного контуру забезпечували як іскрові, так і дугові режими збудження спектрів в атмосфері аргону.

1.1.3 Структура і схемотехніка сучасних імпульсних генераторів іскри та дуги

Розвиток електроніки, поява нових класів напівпровідникових приладів таких як потужні польові транзистори (Power MOS), біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT), потужні швидкісні діоди, спеціалізовані мікросхеми керування імпульсними джерелами живлення, програмовані мікроконтролери, зумовлює подальший прогрес у створенні джерел збудження спектру. Використання цієї елементної бази дозволяє створювати високоефективні малогабаритні генератори з високими аналітико-технічними та сервісними функціями. Слід зазначити, що іскрові та дугові генератори як окремі закінчені пристрої виробляють компанії Росії [58, 59]. Такі джерела застосовують для модернізації застарілого спектроаналітичного обладнання та комплектації нового. Великі західні компанії, як правило, випускають закінчені спектральні прилади, що складаються з джерела збудження спектру, оптики, системи реєстрації спектра, програмного і методичного забезпечення [60, 60, 62, 62]. Оцінка параметрів і технічних рішень сучасних генераторів натрапляє на деякі труднощі через те що компанії, що випускають ці прилади, не докладають до них принципових схем і докладних технічних описів, а

пряме вимірювання параметрів вимагає спеціалізованих вимірювальних стендів та доступу до приладів.

Якщо ще на початку 90-х років минулого століття генератори стаціонарних приладів для аналізу металів будувалися за принципами схеми низьковольтної іскри то в середині 90-х закордонні приладобудівні компанії починають випускати джерела збудження спектру побудовані за принципом керованого джерела струму. Так класичний прилад ARL3460, що випускається компанією Applied Research Laboratories з 1994 року комплектується генератором CCS (Current Controlled Source) в якому форма імпульсів струму задається електронікою і може змінюватися в залежності від методики аналізу [64]. Спектрометри QSN750 німецької компанії OBLF [65] оснащуються генератором з цифровим контролем вихідного струму, що має фірмову назву GDS – Gated Digital Source.

Прилад Spectrolab німецької компанії Spectro оснащується генератором SOURCE3000 з цифровим контролем вихідного струму, що має наступні характеристики [66]:

- швидкість наростання струму 30 А / мкс;
- швидкість зниження струму 100 А / мкс;
- Максимальне значення вихідного струму 350А;
- максимальна частота розрядних імпульсів 1000 Гц;
- точність встановлення струму розряду – 12 двійкових розрядів (0.1А);
- швидкодія 1мкс.

Російська компанія ТОВ «ОКБ СПЕКТР» комплектує свої прилади комбінованим низьковольтним іскровим джерелом SPARK-500 з цифровим керуванням, безпосередньою стабілізацією струму в розряді й накладенням високоенергетичного імпульсу для збудження іонних ліній [67]. Компанія «ИВС», Росія, пропонує генератори серії «Прима» для збудження дугового уніполярного розряду і дуги змінного струму з електронною стабілізацією струму дуги довільною зміною полярності розряду і можливістю

комп'ютерного керування [40]. Компанія «ВМК-Оптоэлектроника», Новосибірськ, виробляє універсальні генератори іскри й дуги «Везувий» і «Шаровая молния», що формують дугові режими: дуга змінного / постійного струму, переривчаста дуга і дуга зі ступінчастим струмом заданої полярності; іскрові режими змінної, або заданої полярності з частотою до 1000 Гц. Всі генератори мають комп'ютерне керування, електронну стабілізацію і високий ККД [38, 68, 69, 70].

Найбільш цікаві технічні рішення і методики їх використання захищаються патентами. Так базові принципи побудови генераторів на основі керованих джерел струму та методики їх застосування описані в патенті США US5285251 [71]. Подальший розвиток цього напрямку пропонується в патенті DE102015002104A1 [72].

1.2 Оптичні прилади АЕСА

Основною функцією спектральних приладів в АЕСА є просторове розкладання на спектральні складові оптичного випромінювання плазми досліджуваної речовини.

1.2.1 Вимоги до спектральних приладів

На відміну від молекулярної спектрометрії й спектрофотометричних методів аналізу, де типова роздільна спектральна здатність приладів складає величину порядку 1нм., ширина ліній в АЕСА приблизно на два порядки менше [73]. До того ж спектри АЕСА дуже насичені, так кількість ліній заліза в ультрафіолетовому діапазоні 200–400 нм становить ~ 3000 [74]. Така велика кількість спектральних ліній дуже гостро ставить проблему накладення ліній.

Оптичні спектральні прилади характеризуються такими основними параметрами: світлосилою і спектральною роздільною спроможністю. Світлосила є енергетичною характеристикою оптики. Вона дорівнює відношенню розмірів апертурної діафрагми до фокусної відстані камери.

Оскільки потужність світлового сигналу пропорційна квадрату світлосили, то зрозуміло прагнення розробників до збільшення цього відношення [75, 76, 77, 78]. Спектральна роздільна здатність залежить від параметрів диспергуючого елемента – дифракційної ґратки або призми. У загальних курсах оптики доводиться, що спектральна роздільна здатність дифракційної ґратки визначається тільки загальною кількістю її штрихів і номером порядку спектра [79, 80, 81]. Величина світлосили і спектральної роздільної здатності кожного спектрометра залежать від вимог розв’язуваної задачі та мистецтва розробника й виробника.

За типом диспергуючого елемента оптичні блоки діляться на призмові, дифракційні та змішані. За роздільною здатністю і світлосилою вони приблизно однакові, але мають деякі специфічні особливості.

1.2.2 Призмові прилади

Позитивною якістю призмових приладів в порівнянні з дифракційними є відсутність накладення порядків спектрів. Але, з укороченням довжини хвилі, зростають труднощі при пошуку оптичних матеріалів з достатньою прозорістю [43, 82]. Крім того, нелінійна залежність показника заломлення від довжини хвилі призводить до відповідної нелінійності дисперсійної кривої, що створює незручності в розшифровці спектрів. Прикладом спектрографа з призмовим дисперсійним блоком є ИСП-51 [77, 83, 84], який працює у видимому і ближньому інфрачервоному діапазоні та ИСП-30, що працює в ультрафіолетовій і видимій частині оптичного спектру [43, 84, 85].

1.2.3 Дифракційні прилади

Спектрографи з дифракційними диспергуючими елементами позбавлені зазначених недоліків призмових приладів. Залежно від форми поверхні ґратки вони поділяються на два типи – з плоскими та з увігнутими дифракційними ґратками. Оптичний блок з увігнутими дифракційними ґратками (схема Пашена-Рунге) дуже простий і має прийнятні для проведення атомно-емісійного аналізу характеристики. Оптична схема квантометра, виконаного за такою схемою, представлена на Рис. 1.7 [29].

Головним елементом блоку є увігнута дифракційна ґратка, яка має одночасно і диспергуючі й фокусуєчі властивості. Вона буде монохроматичні зображення щілини на фокальній поверхні, що має форму кола (коло Роуланда).



Рис. 1.7 Схема спектрометра з увігнутою дифракційною ґраткою [29]

До переваг цієї схеми, крім простоти, можна віднести те, що світло в такій схемі зазнає тільки одне віддзеркалення. Для короткохвильової частини ультрафіолетового діапазону типовий коефіцієнт віддзеркалення дзеркальних покриттів складає 90 – 80%, що призводить до значних втрат в багатодзеркальних системах. До недоліків схеми можна віднести велику величину астигматизму зображення, круглу фокальну площину, – незручну для розміщення багатоканальних фотоприймачів і складність виготовлення увігнутої дифракційної ґратки [43, 86]. На даний час удосконалення технології нарізки дифракційних ґраток і поява голографічної технології виготовлення дифракційних оптичних елементів привело до прогресу в цій галузі. Так нарізні дифракційні ґратки з криволінійними штрихами й змінним кроком нарізки та голографічні ґратки дозволяють частково компенсувати спотворення і в деяких випадках отримати плоску фокальну поверхню [87].

Крім схеми Пашена – Рунге в оптичній спектральній апаратурі застосовуються схеми з плоскими дифракційними ґратками, такі як схема Черні-Тернера і схема Фасти-Еберта [75, 88, 89]. Схема Черні-Тернера представлена на Рис. 1.8. Схема Фасти-Еберта відрізняється тим, що в якості камерного і коліматорного дзеркал використовують ділянки одного великого дзеркала (С + Е).

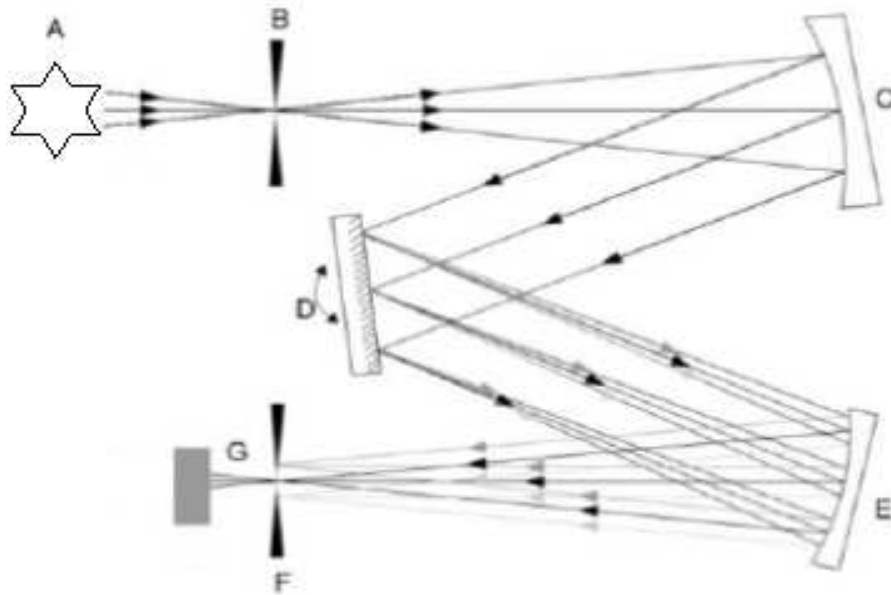


Рис. 1.8 Схема Черні-Тернера. А – джерело спектра, В – входна щілина, С – сферичне коліматорне дзеркало, D – плоска дифракційна ґратка, Е – сферичне камерне дзеркало, F – вихідна щілина, G – фотоприймач [41]

До переваг цієї схеми можна віднести відносну простоту і можливість сканування по спектру за рахунок обертання дифракційної ґратки. Недоліком схеми є великі викривлення через те, що фокусує дзеркала працюють в нецентрованих пучках.

Недоліком всіх вищенаведених оптичних схем слід віднести велику лінійну протяжність спектра, що вимагає використання фотоприймачів з великими лінійними розмірами. Тому доводиться робити стиковку кількох сенсорів для перекриття всього реєстрованого діапазону. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є перехід до оптичних приладів зі схрещеною дисперсією.

1.2.4 Прилади зі схрещеною дисперсією

У приладах зі схрещеною дисперсією використовують ґратки, що працюють у високих порядках спектру. Якщо у звичайних спектральних приладах дифракційні ґратки мають 600–2400 ліній на мм і працюють вони в першому, іноді в другому порядку, то в схемах зі схрещеною дисперсією зазвичай використовують ґратки з частотою 30–100 ліній на мм в 40–80 порядку спектра (ешелле). За рахунок застосування великих номерів порядків вдається отримати спектральну роздільну здатність навіть вище ніж в класичних схемах. Для поділу порядків використовують додатковий диспергуючий елемент, зазвичай призму, з невеликою дисперсією спрямованою перпендикулярно напрямку дисперсії ґратки [89]. Оптична схема і вид спектра такого приладу представлений на Рис. 1.9, 1.10.

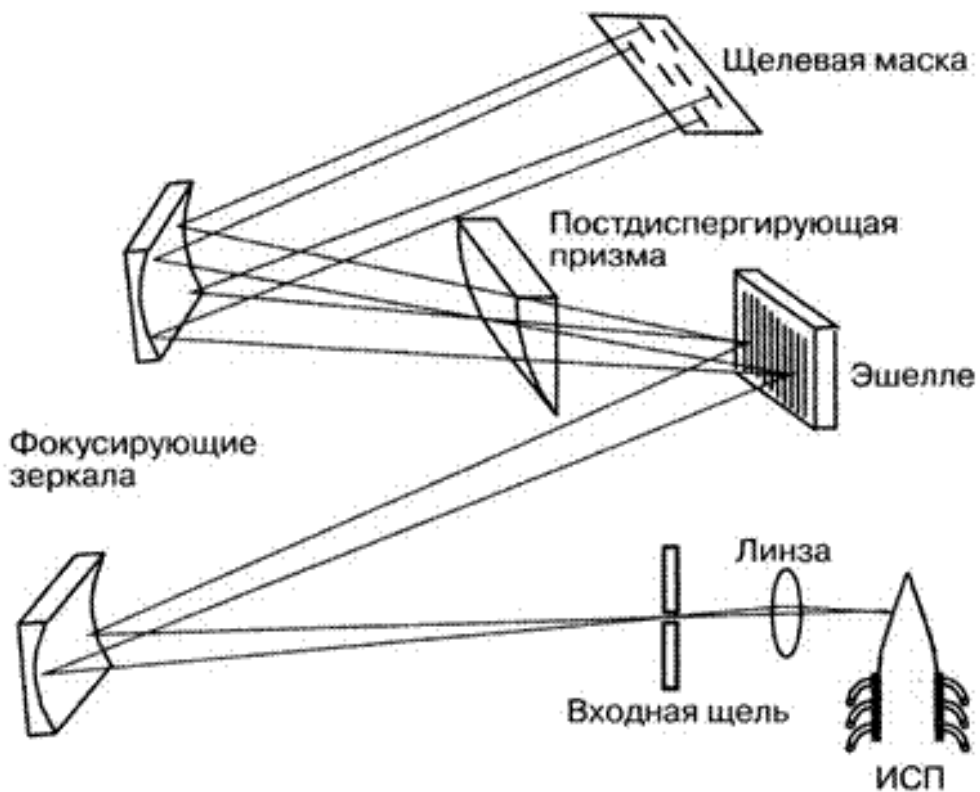


Рис. 1.9 Схема оптичного спектрометра зі схрещеною дисперсією [29]

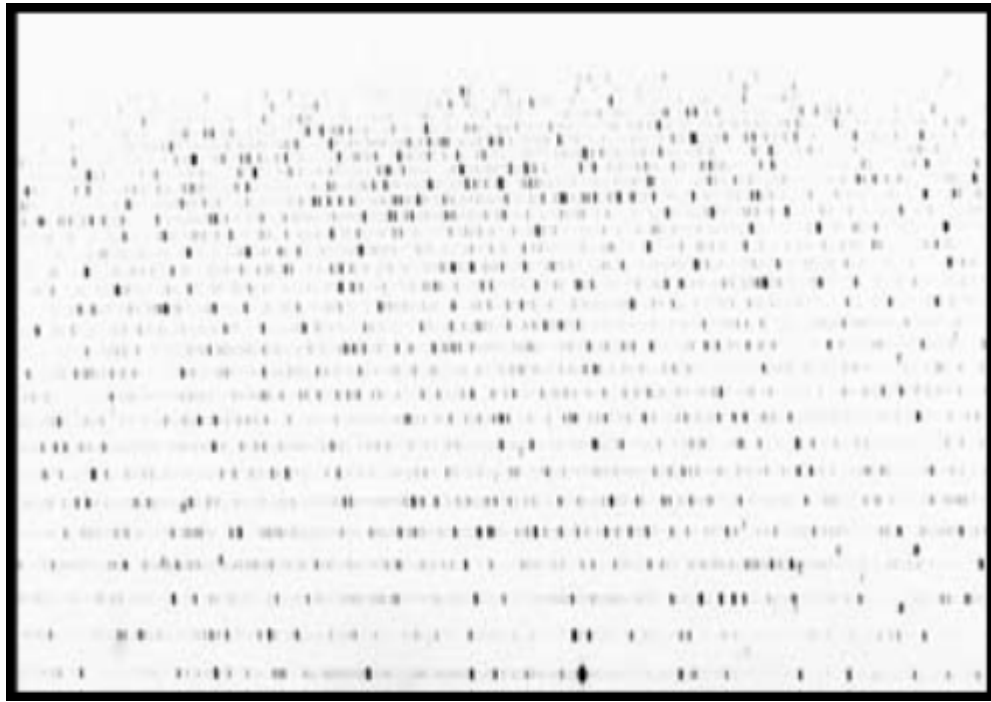


Рис. 1.10 Вигляд ешелле спектра

До недоліків цієї схеми можна віднести підвищену складність, велику кількість оптичних поверхонь, і як наслідок, підвищений рівень розсіяного світла в оптичному блоці [90, 91].

1.3 Системи реєстрації спектра

Історично першою системою реєстрації оптичного спектра було людське око і, попри безліч недоліків, і зараз на виробництві можна зустріти стилоскопи з візуальним спостереженням спектра. Потім для реєстрації спектрів почали використовувати фотоматеріали, а потім і вакуумні прилади з зовнішнім фотоефектом, – фотоелементи та фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Наступним етапом у розвитку засобів реєстрації світла в АЕСА стали твердотілі напівпровідникові фотоприймачі.

1.3.1 ПЗЗ фотоприймачі

На ранніх етапах дискретні твердотілі фотоприймачі, такі як фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, не могли конкурувати з ФЕП по чутливості, лінійності та динамічному діапазону. Але бурхливий розвиток мікроелектроніки й створення на початку 70-х років 20-го століття приладів зі зарядним зв'язком (ПЗЗ) змінило ситуацію [92]. Основним принципом функціонування ПЗЗ є «передача локалізованого заряду за допомогою маніпуляції електричними потенціалами» [93]. Спрощено прилад із зарядним зв'язком можна розглядати як матрицю близько розташованих конденсаторів із структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). З фізичної точки зору ПЗЗ цікаві тим, що електричний сигнал в них представлений не струмом або напругою, як в більшості інших твердотілих приладів, а зарядом. При відповідній послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДН-конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Тому такі прилади й названі приладами з перенесенням заряду або із зарядним зв'язком [94]. На Рис. 1.11 показана структура одного елемента, лінійного трифазного ПЗЗ в режимі накопичення.

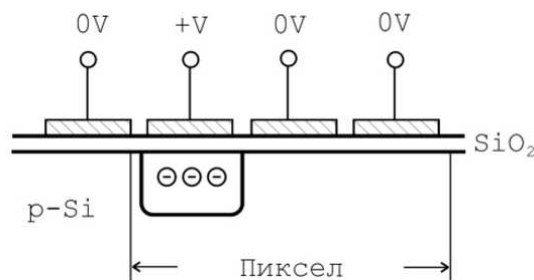


Рис. 1.11 Елемент трифазного ПЗЗ [94]

Структура складається з шару кремнію р-типу (підкладка), ізолюючого шару двоокису кремнію і набору пластин-електродів. Потенціал одного з електродів більш позитивний, ніж інші два, і саме під ним відбувається накопичення заряду. Напівпровідник р-типу отримують додаванням (легуванням) до кристала кремнію акцепторних домішок, наприклад, атомів бору. Акцепторна домішка створює в кристалі напівпровідника вільні

позитивно заряджені носії – дірки. Дірки в напівпровіднику р-типу є основними носіями заряду: вільних електронів там дуже мало. Якщо тепер подати невеликий позитивний потенціал на один з електродів осередку трифазного ПЗЗ, а два інших електрода залишити під нульовим потенціалом щодо підкладки, то під позитивно зміщеним електродом утворюється область, збіднена основними носіями – дірками. Вони будуть витіснені вглиб кристала. Мовою енергетичних діаграм це означає, що під електродом формується потенційна яма (Рис. 1.11). Заряд, накопичений під одним електродом, в будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшений, в той час як потенціал першого електрода, буде зменшений (див. Рис. 1.12). Перенесення в трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямків (вліво або вправо, за малюнками). Всі зарядові пакети лінійки пікселів будуть переноситися в ту ж сторону одночасно [94].

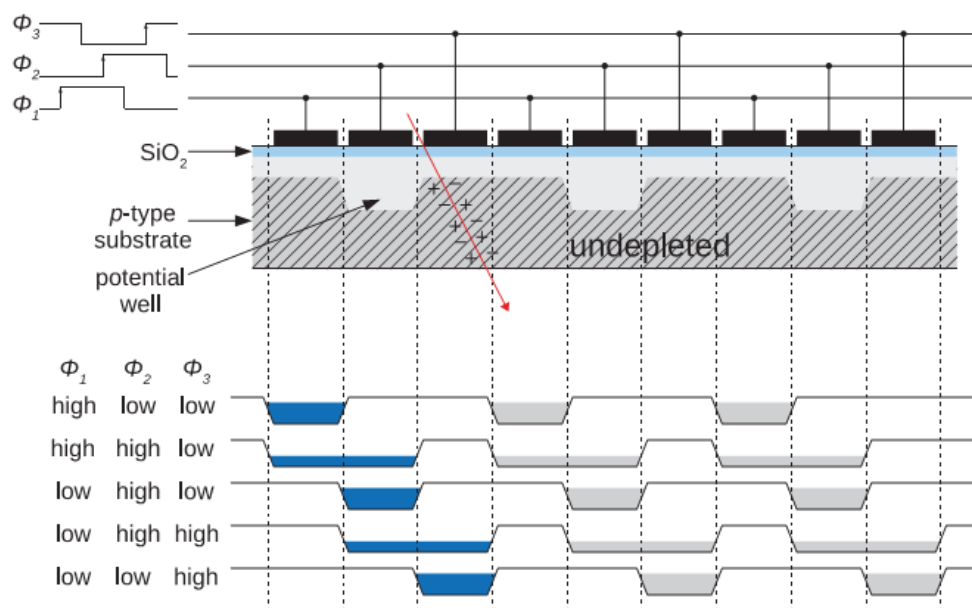


Рис. 1.12 Перенесення зарядів в трифазному ПЗЗ [95]

В основі роботи фото-ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. Коли, в кремнії поглинається фотон, то генерується пара носіїв заряду – електрон і дірка. Електростатичне поле в області пікселя розділяє цю пару,

витісняючи дірку вглиб кремнію. Неосновні носії заряду, електрони, будуть накопичуватися в потенційній ямі під електродом, до якого прикладено позитивний потенціал.

Якщо на поверхні ПЗЗ сформувати зображення, то кількість зарядів накопичених в МДН ємностях буде пропорційно освітленості даного осередку. Потім зарядові пакети, за допомогою послідовності керуючих імпульсів на електродах, переміщують по черзі на вихід формувача, до схеми детектування пакетів. В результаті на виході виходить послідовність імпульсів амплітуда яких пропорційна освітленості осередків фото-ПЗЗ [96,97]. Таким чином ПЗЗ це одна зі схем, не єдина, яка використовується для електронного сканування в багатоеlementних напівпровідникових фотоприймачах, фактично вона є аналоговим зсувним регістром. Сканування можливо як уздовж однієї координати, – в лінійних ПЗЗ, так і вздовж двох координат – в матричних ПЗЗ. Найбільшого поширення набули матричні ПЗЗ, спочатку на телебаченні, а потім у відео і фототехніці вони витіснили передавальні телевізійні трубки, а потім плівкові фотоматеріали. Лінійні фото-ПЗЗ почали використовувати в факсах, сканерах документів, сканерах штрих-кодів [98]. Широке поширення цієї технології призвело до використання ПЗЗ для реєстрації спектрів.

Основні переваги фото-ПЗЗ:

- Багатоканальність – ця властивість наближає твердотілі фотоприймачі по інформативності до фотографічної реєстрації. З'являється можливість реєструвати не окремі спектральні лінії, а цілі ділянки спектра, довільно вибирати, спектральні лінії без переналаштування приладу, визначати не тільки амплітуду лінії, але і її форму, визначати величину фону, враховувати можливі накладення прилеглих ліній, що заважають, і молекулярних смуг.
- Висока просторова роздільна здатність – визначається розміром пікселя. В сучасних ПЗЗ, що використовуються в спектральних приладах, застосовують сильно витягнуту форму пікселя з характерним розміром

вздовж спектра 5–30 мкм і 0.2–2.5 мм поперек спектру. Це робиться для реєстрації максимальної кількості світлового потоку, що пройшов через вхідну щілину спектрального приладу без погіршення роздільної здатності [99].

- Високий квантовий вихід – у сучасних фото-ПЗЗ квантова ефективність доходить 90% [99]. Спектральна чутливість кремнію, основного матеріалу сучасної електроніки, знаходиться в діапазоні від ближньої інфрачервоної області 1.2 мкм до вакуумного ультрафіолету з довжинами хвиль коротше 0,12 мкм, що добре узгоджується зі спектральним діапазоном, що використовується в АЕСА.

Наявні недоліки ПЗЗ можна розділити на два класи – технологічні, пов’язані з недосконалістю дизайну і технології, і принципові, обумовлені принципом функціонування ПЗЗ.

Головною принциповою вадой ПЗЗ є те, що зчитування в приладах даного типу має руйнівний характер – відсутня можливість зчитувати вміст пікселя без занулення його значення, що обмежує динамічний діапазон реєстрованих сигналів. До того ж неможлива довільна адресація пікселів – всі пікселі зчитуються послідовно.

Технологічні недоліки ПЗЗ:

- Ефективність транспортування зарядових пакетів – зарядові пакети послідовно передаються через велику кількість МОН елементів у кожному з яких можливі втрати й викривлення сигналу. В сучасних ПЗЗ типова ефективність транспортування зарядів становить ~ 0.99999 на одну клітинку [98].

- Динамічний діапазон, зверху обмежений місткістю елементарного МОН елемента, при переповненні якого виникає небажаний ефект розтікання зарядів в сусідні елементи – так званий блумінг. Типова місткість ПЗЗ елемента в сучасних приладах складає $10^4 - 10^6$ електрон. Для придушення ефекту блумінга в ПЗЗ елементи вводять додаткові канали відводу надлишкових електронів (антиблумінг) [99, 101]. Знизу динамічний

діапазон обмежений шумами які, в свою чергу, діляться на шуми зчитування і темнові шуми, що залежать від температури напівпровідника. Шуми зчитування виникають в схемі перетворення зарядових пакетів у вихідну напругу, для зменшення впливу шумів даного типу в деяких ПЗЗ використовують схеми електронного множення зарядових пакетів [102, 103, 104]. Теплові шуми виникають внаслідок теплової генерації неосновних носіїв заряду в напівпровідниках, величина темнового струму подвоюється при підвищенні температури на кожні 7°K [96]. Вплив цього виду шумів проявляється при збільшенні часу експозиції. У деяких випадках для зменшення теплових шумів ПЗЗ прилади охолоджують за допомогою термоелектричних холодильників або рідкого азоту [102]. Динамічний діапазон ПЗЗ, що серійно випускаються, складає $0,5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ [105].

- До недоліків ПЗЗ можна також віднести нестандартні рівні сигналів керування і необхідність застосування спеціальних схем обробки вихідних аналогових сигналів [106, 107, 108].

1.3.2 Прилади з зарядовою інжекцією ПЗІ

Розроблені на початку 70-х років компанією General Electric прилади цього типу були побудовані за принципом оперативної пам'яті з довільною адресацією [109, 110, 111]. Фоточутливі пікселі ПЗІ складаються з двох близько розташованих МДН конденсаторів, – один з них накопичувальний, другий вимірювальний. Накопичувальні конденсатори мають адресацію по одній осі (X), а вимірювальні за іншою (Y). Неосновні носії заряду, що генеруються падаючим оптичним випромінюванням збираються в накопичувальному МДН конденсаторі та можуть бути виміряні при передачі в вимірювальний конденсатор, при цьому заряд у вимірювальному конденсаторі не руйнується, а може бути переданий назад в накопичувальний або зруйнований – інжектований в підкладку. Таким чином реалізується принцип неруйнівного зчитування, і довільної адресації читання і скидання пікселів. Ці властивості роблять ПЗІ найбільш відповідним типом фотоприймачів для АЕСА де треба реєструвати безліч спектральних ліній,

амплітуди яких відрізняються на декілька порядків [112, 113]. До недоліків ПЗІ слід віднести більш складний алгоритм керування, більший рівень шумів зчитування, бо шини зчитування підключені до великої кількості фоточутливих елементів [30]. Крім того, до недоліків ПЗІ слід віднести те, що на відміну від ПЗЗ, які дуже поширені, виробляються різними компаніями та мають безліч різних модифікацій, а ПЗІ, у зв'язку з патентними обмеженнями, вироблялися тільки однією компанією CID Technology, придбаною в подальшому Thermo Fisher Scientific Inc. і зараз застосовуються тільки в приладах цієї компанії [112].

1.3.3 КМОН фотоприймачі

Використовувати найбільш поширену технологію виробництва мікросхем КМОН (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник) для створення оптичних сенсорів намагалися з моменту її виникнення [114, 115]. Однак на початку вона настільки програвала якості ПЗЗ, що незважаючи на ряд принципових і технологічних переваг, практично не використовувалася, і тільки з розвитком технології мікроелектроніки набула широкого поширення [116]. Принцип роботи КМОН сенсорів схожий на ПЗІ, відмінність полягає в структурі пікселя. Фоточутливим елементом тут є обернено зміщений фотодіод, (область з легуванням n-типу, розміщена на кремнієвій підкладці p-типу). Транзистор VT1 служить для періодичного заряду фотодіода до напруги шини живлення (Рис. 1.13). Падаюче на фотодіод світло розряджає його ємність пропорційно інтенсивності світлового потоку. Транзистор VT3 служить для підключення повторювача на транзисторі VT2 до шини зчитування [116, 117].

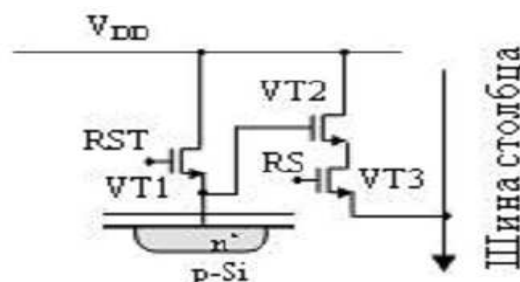


Рис. 1.13 Структура пікселя КМОН сенсора [116]

В даному типі приладів так само як і в ПЗІ можлива довільна адресація, неруйнуюче зчитування і скидання. До цього можна додати широку поширеність і постійне вдосконалення технології виготовлення, сумісність за рівнями сигналів з логічними управляючими схемами та схемами обробки сигналів, відносно низьку вартість. В результаті КМОН технологія поступово витісняє ПЗЗ прилади, як з сегмента широкого споживання, так і з сегмента високотехнологічного наукового обладнання [118].

До недоліків КМОН і ПЗІ приладів можна віднести те, що схема детектування зарядових пакетів, в цих типах фотоприймачів, на відміну від ПЗЗ, знаходиться в кожному пікселі, і внаслідок технологічного розкиду параметрів з'являється шум пов'язаний з нерівномірністю чутливості та крутизни перетворення схем детектування зарядів, – (fixed pattern noise) [118, 119].

Висновки до розділу 1

Незважаючи на більш ніж столітню історію апаратура емісійного спектрального аналізу продовжує розвиватися, використовуючи сучасні наукові й технологічні досягнення.

1. Поява нових джерел збудження спектру, таких як ВЧ і НВЧ плазмотрони, лазери, джерела тліючого розряду не скоротив кількість аналізів, що виконуються за допомогою дуги й іскри. Іскрові та дугові генератори залишаються найпоширенішими у виробничій і лабораторній практиці. Провідні приладобудівні компанії, використовуючи нові покоління силових напівпровідникових приладів, мікропроцесорних систем контролю, цифрових систем обробки сигналів, ініціюють постійне підвищення метрологічних, експлуатаційних можливостей сучасних генераторів. При цьому актуальним завданням залишається створення іскрових і дугових джерел збудження спектру, на сучасній елементній базі, з підвищеними

метрологічними характеристиками для модернізації наявного на виробництві та в лабораторіях спектрального обладнання.

2. Розвиток спектральної оптики, на даний час, забезпечується за рахунок можливостей, що відкрилися з розвитком комп'ютерної техніки для розрахунку і моделювання оптичних систем. Нові технологічні можливості, такі як нарізка увігнутих дифракційних ґраток з криволінійними штрихами й нерівномірним кроком, а також голограмні технології, дозволяють значно поліпшити параметри класичних оптичних схем приладів. У поєднанні з новими типами твердотілих фотоприймачів все більшу популярність завоюють раніше малопоширені схеми оптичних приладів.

3. Прогрес напівпровідникової електронної технології забезпечує безперервне вдосконалення багатоканальних оптичних фотоприймачів. У багатьох випадках застосування найбільш досконалих спеціалізованих фотоприймачів стикається з патентними, торговими та ціновими обмеженнями, що призводить до актуальності використання в спектральній апаратурі фотоприймачів масового сегмента ринку, та пошуку шляхів збільшення їх роздільної здатності та розширення спектрального та динамічного діапазону.

РОЗДІЛ 2

ДЖЕРЕЛО ПЛАЗМИ З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ ПАРАМЕТРАМИ РОЗРЯДУ

У розділі наведені вимоги, схемотехніка і конструкція дугового генератора збудження емісійних спектрів авторської розробки «ЦУГ-2» [11, 120]. Приведені схемотехнічні рішення, результати розрахунку і моделювання джерела струму для живлення розряду, запропонована оригінальна схема джерела струму з підвищеною швидкодією. Наведений опис блоків генератора. Викладені результати порівняльних випробувань «ЦУГ-2» з «УГЭ-4» – генератором, що серійно виробляється [11, 35].

2.1 Принципи побудови генератора ЦУГ-2

Джерело збудження спектру є ключовим елементом апаратури АЕСА, що має визначальний вплив на точність вимірювань і можливість отримання спектрів елементів, що аналізуються. Стандартні генератори іскри й дуги, що використовуються в лабораторній практиці, такі як ДГ-2, ДГ-3, ИГ-3, ИВС-23, ИВС-28, УГЭ-4 [2, 3, 35], мають суттєві недоліки, що відзначено у пунктах 1.1.1, 1.1.2 першого розділу. Тому однією з проблем яка була вирішена в дисертації було створення генератора який відповідає сучасним потребам лабораторної та виробничої практики, а також вивчення впливу режимів роботи та параметрів генератора на характер отриманих спектрів.

В процесі проведення досліджень було спроектовано і випробувано кілька варіантів генераторів іскрового і дугового розрядів для лабораторних досліджень і впровадження їх у виробництво. Спочатку проектування було направлено на створення генератора за схемою низьковольтної іскри, але потім було прийнято рішення застосувати схему на принципі безпосереднього формування розрядного струму за допомогою схемотехніки потужних активних джерел струму. Такий підхід забезпечує повний

цифровий контроль за формою струму в плазмовому утворенні, що підвищує стабільність вимірювань і відкриває широкі можливості по керуванню параметрами розряду. Основним обмеженням дугових джерел є те, що вони збуджують спектральні лінії з низьким рівнем збудження, розширення цього діапазону вимагає збільшення швидкості наростання струму й імпульсної потужності в розряді, що нашоується на обмеження сучасної напівпровідникової елементної бази.

В більшості сучасних генераторів форма розрядного струму має профіль зображений на Рис. 2.1 [71], який дозволяє на першій ділянці імпульсу (0–40 мкс) забезпечити ефективний розігрів розрядного проміжку та випаровування певної кількості зразка, що аналізується. На другій ділянці (40–80 мкс) забезпечуються стабільні умови збудження необхідних спектральних ліній і відбувається реєстрація спектру.

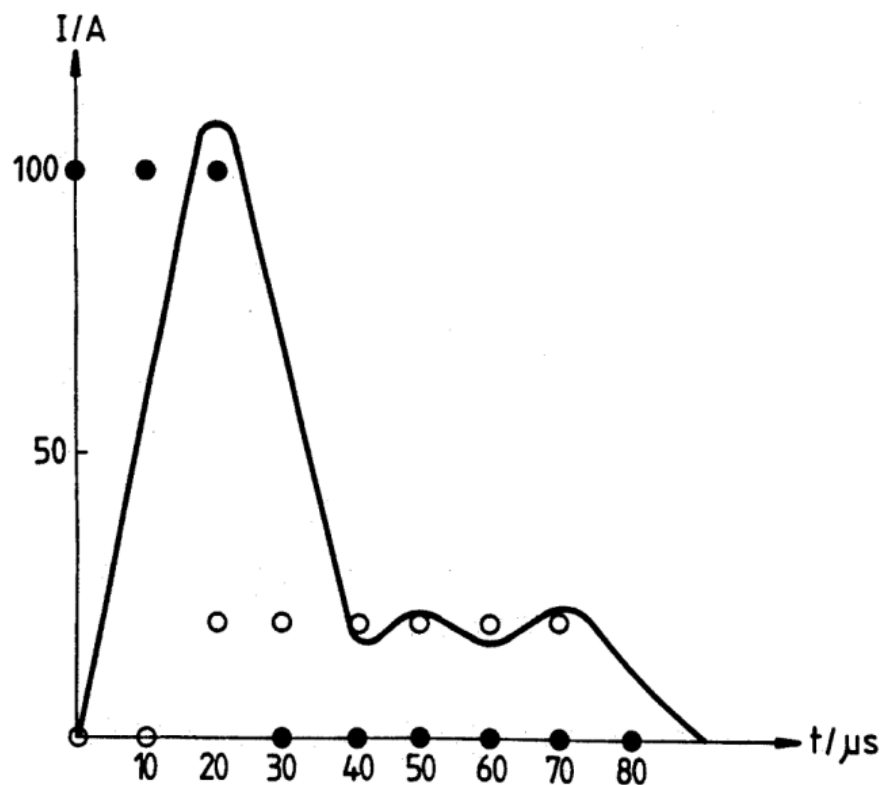


Рис. 2.1 Форма розрядного струму генератора [71]

Але в залежності від властивостей зразка, що досліджується таких як: хімічний склад, стан зразка, геометричні розміри, теплопровідність,

температура плавлення і випаровування, потенціал іонізації, якість обробки поверхні та ін., а також в залежності від методики проведення вимірювання, параметри розрядного струму потребують значних змін.

Можливості корегування потребують як амплітуда, профіль, тривалість, швидкість наростання та спаду імпульсу, так і загальна кількість імпульсів і характер зміни параметрів імпульсів впродовж вимірювання.

Як правило, всі сучасні генератори працюють за схемами імпульсних перетворювачів з частотою перетворення 20–50 кГц. Це дозволяє значно поліпшити масо-габаритні показники й ККД апаратури, а також забезпечити працездатність в широкому діапазоні значень мережі живлення. Використання в них мікропроцесорів аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів, комп'ютерних інтерфейсів дозволяє програмно задавати частоту і форму розрядних імпульсів. Електронна стабілізація забезпечує високу точність підтримки розрядного струму незалежно від величини міжелектродного проміжку, стану електродів і напруги живильної мережі [120].

2.2. Структурна схема і технічні рішення

Впровадження сучасної елементної бази та програмних засобів розробки й наладки мікропроцесорної апаратури дозволило розробити та виготовити генератор на рівні кращих закордонних зразків. Структурна схема генератора представлена на Рис. 2.2., а зовнішній вигляд однієї з останніх модифікацій такого цифрового універсального генератора «ЦУГ-2» представлено на Рис. 2.3.

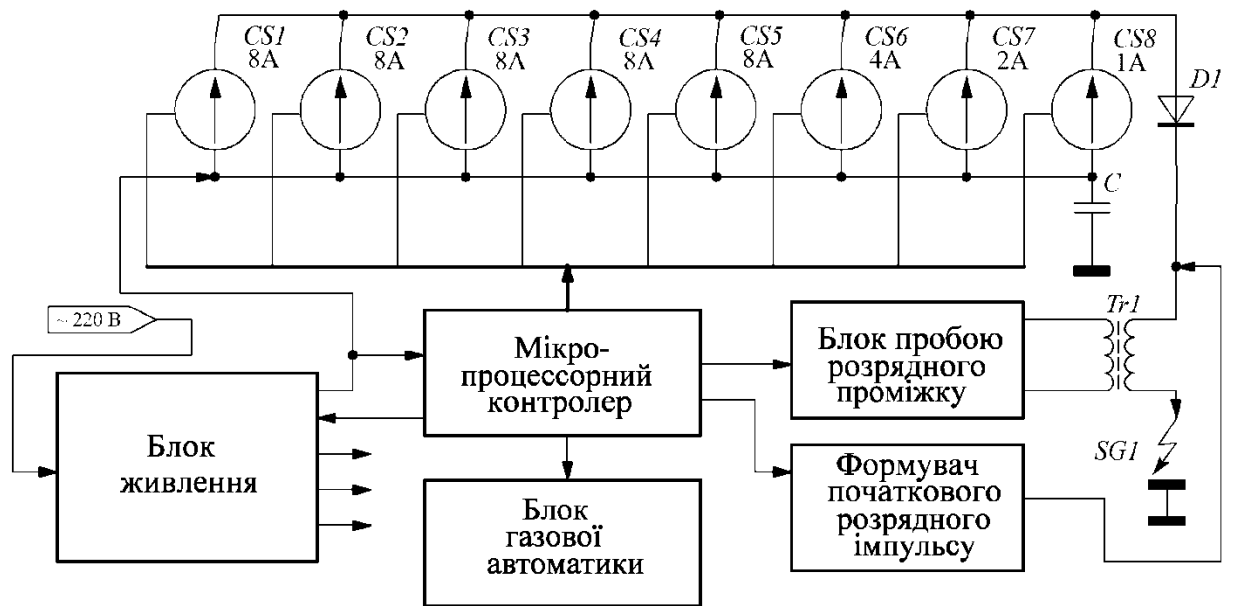


Рис. 2.2 Структурна схема генератора ЦУГ-2 [11]

Структурна схема складається з:

1. Блоку живлення, до якого входять:
 - блок стабілізації первинної напруги ;
 - силове джерело живлення дугового розряду;
 - допоміжне джерело живлення схем керування.
2. Джерел струму з цифровим керуванням (CS1– CS8).
3. Мікропроцесорного контролера з клавіатурою, індикацією і зовнішнім інтерфейсом.
4. Блоку пробую розрядного проміжку.
5. Блоку формування початкового імпульсу розрядного струму.
6. Блоку газової автоматики.

Генератор забезпечує формування малопотужних імпульсів пробую розрядного проміжку амплітудою до 12 кВ, дугових імпульсів основного розряду в діапазоні 1 – 47 А з накладенням допоміжних імпульсів струму амплітудою до 150 А. Максимальна частота розрядних імпульсів становить 800 Гц. Потужність розряду – до 1200 Вт.



Рис. 2.3 Зовнішній вигляд генератора ЦУГ-2 [11]

2.2.1 Блоки керування і живлення

Мікропроцесорний контролер розроблено на базі 32-розрядного вбудованого мікропроцесора STM32F103 компанії STmicroelectronics. Він забезпечує керування і синхронізацію блоків генератора. Мікропроцесор має швидкодію близько 70 млн. операцій в секунду, кілька каналів АЦП і ЦАП, дискретні входи/виходи для приймання логічних сигналів і керування зовнішніми пристроями, а також реалізовані на кристалі послідовні інтерфейси для зв'язку з зовнішніми приладами [121]. Зовнішнє керування реалізовано у вигляді гальванічно розв'язаного інтерфейсу SPI, підключеного безпосередньо до блоку реєстрації спектрів, що дозволило забезпечити повну синхронізацію імпульсів, які запускають розряд синхронно з діаграмою зчитування спектральних даних, а також здійснювати керування режимами генератора з центрального комп'ютера по єдиному інтерфейсу USB через блок реєстрації спектрів. Також можливо ручне керування генератором через плату керування і індикації, до складу якої входить функціональна клавіатура та монохромний рідкокристалічний індикатор. Додатковими засобами індикації є світлодіод і звуковий динамік.

Блок стабілізації первинної напруги забезпечує випрямлення і стабілізацію напруги промислової мережі, що живить генератор. Це має суттєве значення для промислових умов експлуатації, де стабільна мережа є рідкісним винятком із правила. Основою блока є активний коректор коефіцієнта потужності, виконаний з використанням спеціалізованої мікросхеми IR1150 компанії Internatinal Rectifier [122, 123, 124]. Крім того, до складу пристрою входять вузол обмеження пускового струму зарядки конденсаторів, і фільтри завад. Блок забезпечує підтримку первинної напруги 385В при зміні напруги живлення в діапазоні 120–260В, і забезпечує коефіцієнт потужності в межах 0.93 – 0.95.

Допоміжне джерело живлення блоку керування створювалося на базі промислового мережевого джерела живлення 24В / 2А, вузла формування змінної напруги 24В на частоті 24кГц і перетворювача 12В для живлення вентиляторів охолодження. Змінна напруга 24 В з частотою 24 кГц використовується для живлення плат блоку керування, при цьому забезпечується гальванічна розв'язка з мережею живлення за допомогою малогабаритних високочастотних трансформаторів і найпростіших випрямлячів. Це забезпечує працездатність чутливих до перешкод вузлів в умовах потужних електромагнітних завад від імпульсних струмів, що циркулюють в генераторі. Крім того, допоміжне джерело забезпечує живлення плати керування електромагнітними реле і газовими клапанами.

Силове джерело живлення дугового розряду перетворює первинну напругу 385 В на проміжну напругу 55...75 В з гальванічною розв'язкою від первинного електричного кола. Максимальна потужність джерела складає 1400 Вт. Джерело функціонує за принципом мостового інвертора напруги з частотою перетворення 70 кГц.

На жаль, безпосереднє живлення імпульсної дуги від силового імпульсного джерела живлення зустрічає істотні складності при практичній реалізації. В цьому випадку важлива як точність підтримки струму на виході джерела, так і висока швидкість наростання струму в розряді після пробою

розрядного проміжку, в іншому випадку розряд мимовільно згасає. Зазвичай імпульсні джерела живлення, з широким діапазоном вихідної напруги, мають у вихідному випрямлячі дроселі зі значною індуктивністю, що обмежує швидкість наростання вихідного струму. В результаті була розроблена схема з проміжним ємнісним накопичувачем після силового інвертора напруги на вході наступного блока – джерела струму з цифровим керуванням.

2.2.2 Джерело розрядного струму

Джерело струму з цифровим керуванням складається з восьми модулів джерел струму (CS1...CS8) на потужних польових транзисторах, налаштованих на фіксовані значення струмів: п'ять джерел по 8 А і по одному на 4 А, 2 А та 1 А. Усі джерела струму включені за принципом ЦАП зі складанням струмів: їх вихідні струми складаються в навантаженні. Вони керуються мікропроцесорним контролером по паралельному інтерфейсу, при цьому на входи АЦП мікроконтролера надходять сигнали, що пропорційні до величин вхідної та вихідної напруги та струму. Таке схемне рішення дозволяє формувати вихідний струм у діапазоні 0...47 А з дискретністю в 1 А та швидкістю наростання і спаду не менше 30 А/мкс. Розсіювана потужність розподіляється на кілька силових транзисторів, чим забезпечується безпечний режим їх роботи. Крім того, керуючий контролер регулює величину падіння напруги на транзисторах джерел струму в межах 2...5 В, що забезпечує їх функціонування. У результаті імпульсна потужність, що розсіюється усіма транзисторами, не перевищує 200 Вт при вихідній потужності в імпульсі понад 2 кВт.

Було досліджено кілька різновидів джерел струму, в тому числі:

1. Джерело струму на біполярному транзисторі (MJE15033) [125].
2. Джерело струму на складеному біполярному транзисторі з високим коефіцієнтом передачі струму (2N6042) [126].
3. Джерело струму на польовому транзисторі (IRF9540) [127].

4. Комбіноване джерело струму на польовому транзисторі з шунтувальним датчиком струму на малопотужному біполярному транзисторі (IRF9540, MMBT5401) [127, 128].

Досліджувалися статична передавальна характеристика, швидкодія і температурна характеристика. У таблицях 2.1 і 2.2 наведені паспортні характеристики транзисторів.

Таблиця 2.1

Основні характеристики біполярних транзисторів [125, 126, 128]

Тип транзистора	U _{ce} (V)	I _c (A)	h _{21e}	V _{ce} (Sat) (V)	F _t (MHz)	C _{ob} (PF)
MJE15033	250	8	10	0.5	30	–
2N6054	80	8	750	3	–	350
MMBT5401	150	0.6	50	0.5	300	6

Таблиця 2.2

Основні характеристики польових транзисторів [127]

Тип транзистора	U _{ds} (V)	I _c (A)	R _{ds} (Ohm)	C _{in} (PF)	C _{out} (pF)	T _{on} (Ns)
IRF9540	100	13	0.2	1400	590	73
IRF6215	150	9	0,29	860	220	36

Моделювання провадилося за допомогою програми схемотехнічного моделювання MicroCap 12 [129], з подальшим практичним макетуванням найкращих варіантів схем [11].

Перші три різновиди джерел струму були створені за схемою, яка містить джерело напруги U_b в колі бази (затвора) (U_b) і резистора, що задає рівень струму в колі емітера (витоку) R_1 . У всіх варіантах схем величина резистора, що задає струм, була однаковою (0.1 Ом). Схема джерел струму на

$$I_c = (U_b - U_i) / R_I, \quad (2.1)$$

де – U_i порогова напруга база-емітер (затвор-витік) переходу транзистора в провідний стан. Для біполярних транзисторів $U_i = 0.6...0.7$ В з температурним коефіцієнтом – 1.7 мВ/К° [130, 131], для польових $U_i = 4...5$ В з температурним коефіцієнтом – 5 мВ/К°[131].

Результати моделювання вихідної характеристики джерел струму залежно від напруги живлення представлено на Рис. 2.6. Найнижчий вихідний опір і нелінійну передавальну характеристику має генератор струму на стандартному біполярному транзисторі (MJE15033). Основними причинами цього є вплив ефекту Ерлі (модуляції ширини бази колекторною напругою) і низький коефіцієнт передачі по струму (~ 10) при струмах колектора близьких до максимального [125, 131]. Істотно кращу характеристику має джерело струму на складеному біполярному транзисторі (2N6054), що пояснюється високим коефіцієнтом передачі по струму. Відмінною особливістю складових транзисторів є підвищена напруга насичення колектор-емітер, що обумовлює зсув початкової точки графіка з рівнем напруги $0.7-0.8$ В [126, 131].

Крутизна характеристики джерела струму на польовому транзисторі (IRF9540) на початковій лінійній ділянці, обумовлена крутизною характеристики й опором каналу транзистора, а також величиною опору в колі витоку. В області насичення слабке зростання струму стоку пояснюється модуляцією довжини каналу при збільшенні напруги. Комбінована структура поєднує високу крутизну характеристики на лінійній ділянці, що пояснюється високим рівнем відкриваючої напруги на затворі, і високий диференціальний опір в області обмеження струму за рахунок високого коефіцієнта посилення малопотужного біполярного транзистора.

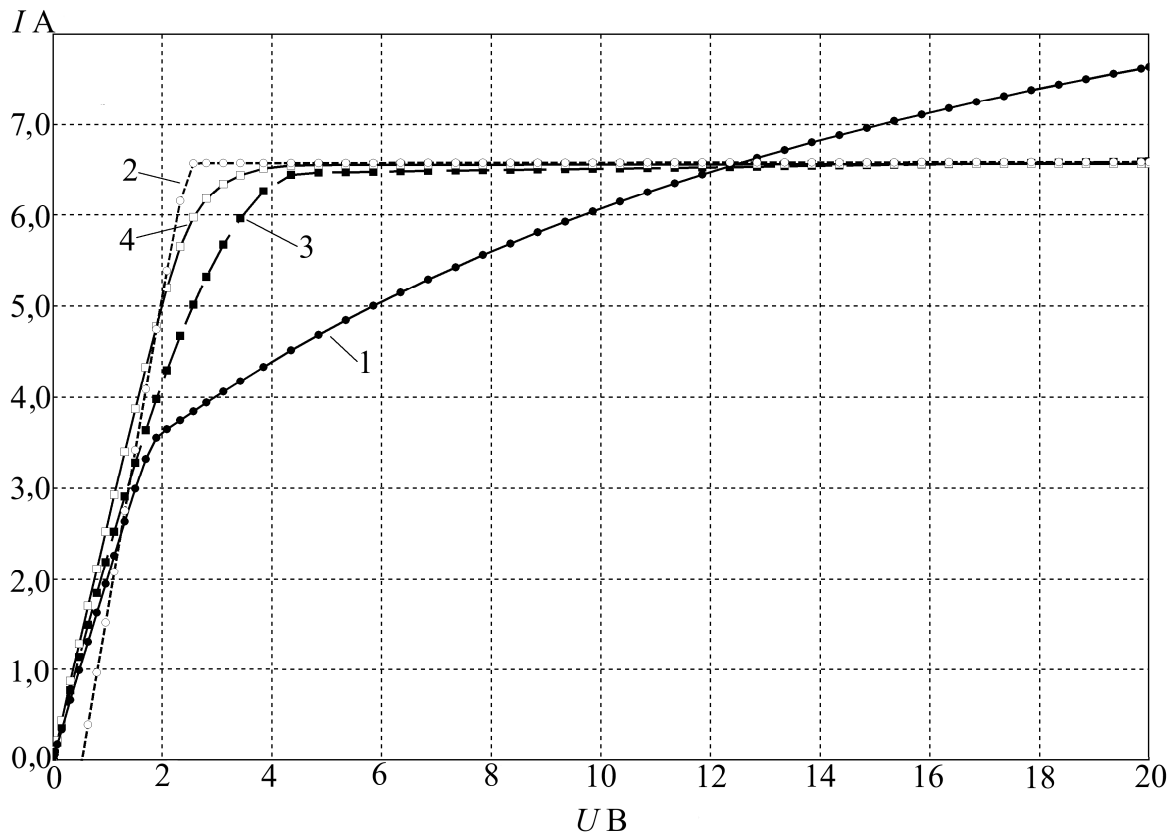


Рис. 2.6 Статичні характеристики модулів джерел струму: 1 – на біполярному транзисторі (MJE15033); 2 – на складеному біполярному транзисторі (2N6054); 3 – на польовому транзисторі (IRF9540); 4 – побудованого за комбінованою схемою (IRF9540 + MMBT5401)

Для АЕСА важливе значення мають швидкість наростання і спаду імпульсів струму в розряді. Висока швидкість наростання струму забезпечує необхідні передумови для появи важкозбуджуваних іонних ліній з високими рівнями іонізації. Висока швидкість спаду дозволяє скористатись методиками реєстрації післясвітіння ліній аналізованого елемента після закінчення основного струму в розряді для випадку спектроскопії з часовим розділенням [66].

Реакції розглянутих модулів (Рис. 2.4 і 2.5) на прямокутний вхідний імпульс струму тривалістю 5 мкс наведено на Рис. 2.7. Всі графіки отримано для активного навантаження 5 Ом при напрузі 50 В.

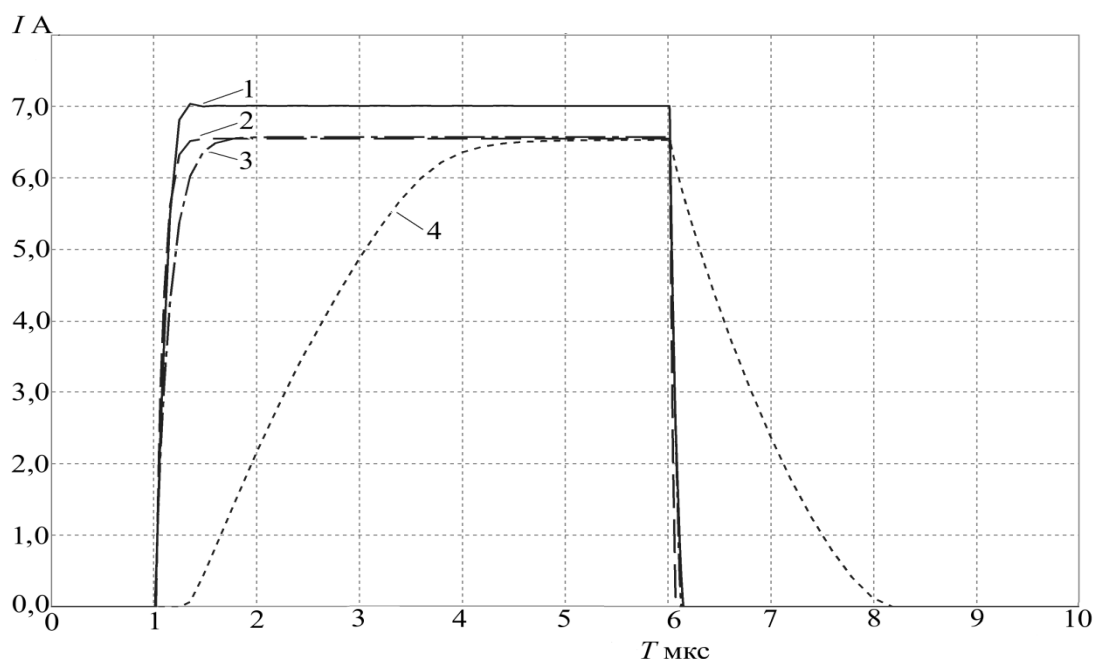


Рис. 2.7 Реакції на прямокутний імпульс модулів джерел струму: 1 – на біполярному транзисторі (MJE15033), 2 – на польовому транзисторі (IRF9540), 3 – на складеному біполярному транзисторі (2N6054), 4 – за комбінованою схемою (IRF9540 + MMBT5401)

Як видно з Рис. 2.7, перевагу мають джерела струму на стандартному біполярному і польовому транзисторах. Швидкість наростання і спаду струму у колах колектору (витоку) становить 31 А/мкс. Дещо гірші результати показує джерело на складеному біполярному транзисторі. Тут швидкість наростання струму становить величину ~ 17 А/мкс, що пояснюється гіршими частотними властивостями складових транзисторів. Найгірші результати показало джерело струму, побудоване за комбінованою схемою в якій швидкість наростання струму складає 2,6 А/мкс. Це пояснюється великою сталою часу кола заслону, що обумовлена опором струмообмежувального резистора R3, розрядного резистора R2 і ємністю затвору (для даного транзистора ~ 1400 пФ) (Рис. 2.5). Слід зазначити, що реакція модуля джерела струму на польовому транзисторі (Рис. 2.4б) моделювалася заміною джерела напруги зсуву затвора U_b на імпульсний генератор з вихідним опором 10 Ом. У випадку застосування для керування схеми з відкритим колектором, з вихідним опором кілька кілоом, реакція

цього варіанта модуля на прямокутний імпульс вельми близька до тої, яку має модуль, побудований за комбінованою схемою (Рис. 2.5). Для усунення цього недоліку до схеми Рис. 2.5 були внесені зміни (Рис. 2.8). У коло керування затвором був доданий двотактний емітерний повторювач на двох комплементарних біполярних транзисторах, що забезпечує величину зарядного струму для ємності затвора до 1А.

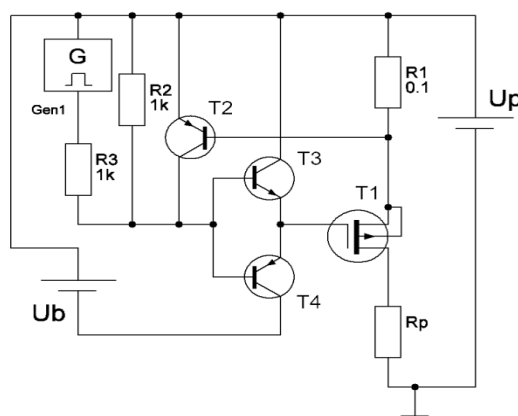


Рис. 2.8 Удосконалена схема комбінованого джерела струму

Рис. 2.9 дозволяє порівняти реакції модулів джерел струму, схеми яких зображено на Рис. 2.5 і 2.8, на прямокутний імпульс тривалістю 5 мкс.

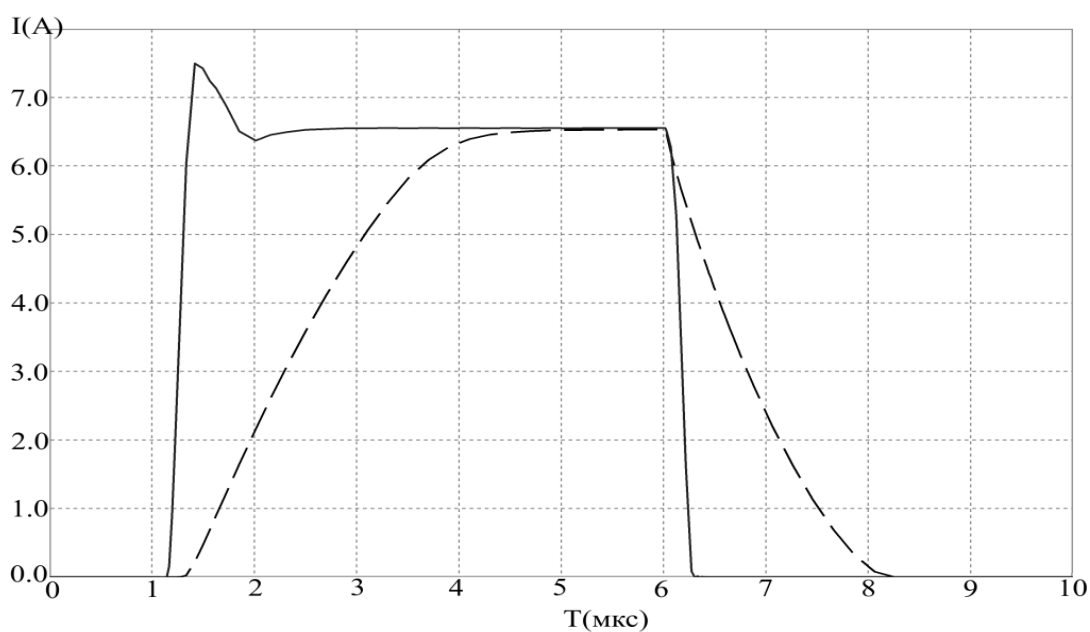


Рис. 2.9 Порівняння реакцій на прямокутний імпульс модулів комбінованих джерел струму, схеми яких наведено на Рис. 2.5 (штрихова лінія) і Рис. 2.8. (суцільна лінія)

У запропонованій модифікації модуля затримка включення зменшилася у два рази з 280 до 140нс., а швидкість наростання струму збільшилась з 2.6 до 31А/мкс. Наявність короткого (~ 1 мкс) перехідного процесу на фронті імпульсу в даному випадку можна вважати позитивною властивістю, що забезпечує форсування струму в початковій фазі виникнення розряду.

Комп'ютерне моделювання температурних характеристик запропонованих джерел струму викликає певні труднощі. Це пов'язано з відсутністю температурних параметрів у наявних SPICE-моделях застосовуваних транзисторів, а також складністю врахування в реальній апаратурі такого важливого для потужних напівпровідникових компонентів конструктивного фактора як тепловідведення.

Аналітична оцінка дрейфу вихідного струму для джерела струму на біполярному транзисторі визначається виразом [131]:

$$\frac{dI}{dT} = \frac{1}{R_1} \frac{dU_{BE}}{dT} \approx \frac{2mV / K}{R_1}. \quad (2.2)$$

Для польового транзистора залежність більш складна, оскільки величина його порогової напруги залежить від типу транзистора, його параметрів і технології виготовлення. При зміні температури змінюється не тільки гранична напруга, але й крутизна характеристики та опір каналу.

У літературі наводиться діапазон можливих значень температурної залежності порогової напруги польових МОН-транзисторів в інтервалі -2...-5 мВ/К [131].

Температурна характеристика комбінованих структур (Рис. 2.5, Рис. 2.8) визначається в основному температурною характеристикою біполярного транзистора Т2. Перевагами цих структур є те, що в них допоміжний біполярний транзистор Т2 розсіює досить незначну потужність і працює при температурі навколишнього середовища, основне ж теплове навантаження при цьому припадає на транзистор Т1 з додатковим тепловідводом. У результаті, з урахуванням сукупності перелічених

параметрів, генератор був побудований за схемою, яка представлена на Рис. 2.8.

2.2.3 Блоки пробою розрядного проміжку, формування розряду і підтримки газового середовища

Блок пробою розрядного проміжку забезпечує високовольтний пробій і початкову іонізацію розрядного проміжку. До цього вузла висуваються суперечливі вимоги:

- він повинен формувати високовольтні імпульси амплітудою не менше 10 кВ;
- частота слідування цих імпульсів має досягати 1 кГц;
- індуктивність, яку блок вносить у розрядний контур, повинна бути мінімальною задля запобігання обмеження швидкості наростання струму.

Існує кілька схемних рішень пристрою, який може задовольнити переліченим вимогам:

- схема з послідовним включенням високовольтної обмотки трансформатора в розрядний контур;
- схема з паралельним розрядом високовольтного конденсатора;
- триелектродна схема (Рис. 2.10).

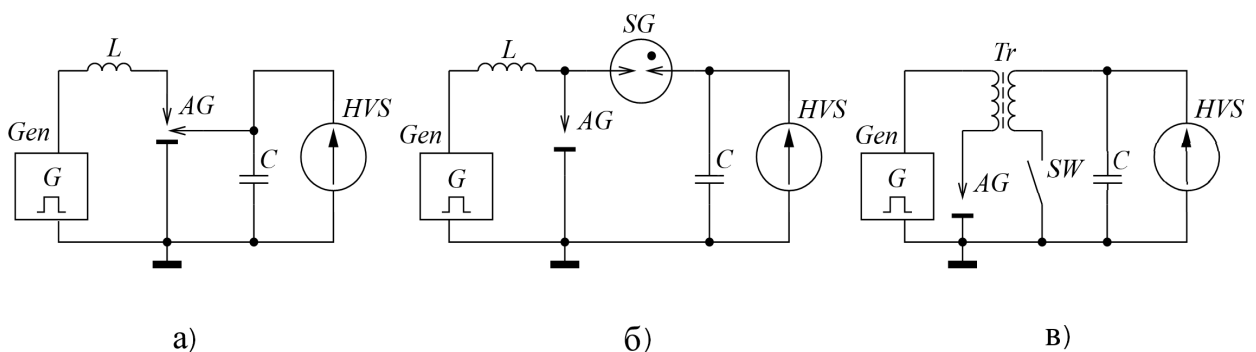


Рис. 2.10 Триелектродна (а), паралельна (б), послідовна (в) схеми пробою розрядного проміжку. Умовні позначення: Gen – генератор імпульсів основного струму; HVS – допоміжне високовольтне джерело струму; AG – аналітичний розрядний проміжок; SG – додатковий газовий розрядник; SW – ключ розряду накопичувального конденсатора схеми ініціації

У процесі досліджень були випробувані всі три варіанти. Було встановлено, що триелектродна схема вносить мінімальну паразитну індуктивність у розрядний контур, але істотно ускладнює електродний вузол і вимагає постійного підстроювання. Це викликає великі труднощі, особливо в виробничих умовах. Крім того, третій електрод є додатковим джерелом забруднення плазми розряду. Побудова паралельної схеми можлива тільки за допомогою газового розрядника і вимагає його періодичної заміни або обслуговування. Без використання розрядників вдалося створити тільки послідовну схему. Індуктивність, яка вноситься в розрядний контур при використанні феритового трансформатора в режимі насичення, не перевищує 20 мкГ. Імпульс струму в первинній обмотці трансформатора формується внаслідок розряду імпульсного конденсатора. Він, заряджений до напруги 600 В, розряджається через пару швидкодіючих напівпровідникових ключів, включених за схемою асиметричного прямоходового напівмостового перетворювача [132]. Таке схемне рішення забезпечує рекуперацію імпульсів, пов'язаних з індуктивністю розсіювання трансформатора, і обмежує величину напруги на комутуючих ключах величиною напруги живлення.

Для гнучкого керування блоком і забезпечення контрольованих режимів роботи було застосовано однокристальний мікроконтролер ATtiny13A виробництва компанії Atmel [133]. У результаті пробійна напруга на розрядному проміжку може досягати 18 кВ. Цим забезпечується стабільний пробій розрядного проміжку навіть в умовах сильного окиснення і забруднення проби та протиелектрода. Максимальна частота проходження розрядів складає 1000 Гц. Для зменшення впливу індуктивності та ємності сполучних проводів, а також зниження рівня електромагнітних завад блок пробою розрядного проміжку виконано у вигляді окремого пристрою та розташовано в безпосередній близькості від розрядної камери.

Блок формування початкового імпульсу розрядного струму (бустер) – служить для розширення діапазону режимів іонізації плазми, контролю процесів пробовідбору і підвищення стабільності горіння розряду.

У початковій фазі розряду блок формує короткий ($\sim 10 \dots 30$ мкс) імпульс струму амплітудою до 150 А. Блок складається з імпульсного конденсатора, підключеного паралельно до розрядного проміжку, і кола для його заряджання. При цьому величина напруги на конденсаторі регулюється в межах 200...600 В.

Блок газової автоматики служить для створення і підтримки контрольованого газового середовища в розрядній камері. Як правило розрядна камера продувається аргоном. Інертний газ у розрядному проміжку забезпечує такі переваги:

- дозволяє використовувати в розрядному вузлі незмінний вольфрамовий електрод з тривалим терміном служби;
- значно знижує окиснювальні процеси на пробі;
- прибирає зі спектра молекулярні смуги, що маскують значні його ділянки;
- підвищує чутливість аналізу;
- розширює діапазон лінійності калібрувальних графіків;
- дозволяє проводити аналіз в області вакуумного ультрафіолету з довжинами хвиль коротше 195нм., де поширення світла блокується киснем повітря.

Блок складається з декількох електромагнітних газових клапанів, комутуючих потоки газу, дроселів, що регулюють витрату газу, манометра і датчика тиску, для контролю тиску газу на вході газової магістралі, розрядному штативі та сполучних фітінгів. Інтенсивність продувки, а також тиск в розрядній камері, контролюються за допомогою мікропроцесорного контролера генератора, а саме, платою комутації електромагнітних реле і клапанів.

2.3 Порівняння розробленого генератора з генератором УГЭ-4

Під час експлуатації генератора ЦУГ-2 були здійснені вимірювання параметрів розрядного кола, характерних напруг і струмів плазових утворень, а також зареєстровані їх спектральні характеристики.

Випробування генератора ЦУГ-2 полягали в порівняльних дослідженнях з використанням джерел випромінювання різних типів – промислових генераторів іскри / дуги, спектральних ламп з порожнистим катодом та напівпровідникових світлодіодів. Випробування в реальних заводських умовах відбувалися з використанням як стандарту одного з кращих генераторів серійного виробництва – УГЭ-4 [35]. Генератори ЦУГ-2 і УГЭ-4 було встановлено у двох різних лабораторіях в комплекті з однаковими спектрографами ИСП-30 [85] і однаковими системами реєстрації спектра, котрі описані в [11, 26].

Оскільки в обох лабораторіях використовувались однакові спектрографи й системи реєстрації, то пов'язана з ними компонента помилки в різниці результатів мінімізувалася. Завдяки цьому з'явилася можливість отримати компоненту помилки генераторів, вільну від впливу помилок як оптичного вузла, так і блока реєстрації спектра. В обох випадках використовувався той же самий зразок сталі та фотометрувалися ті ж самі спектральні лінії за максимально близьких умов. Для забезпечення надійної статистики було виконано $N \approx 500$ вимірювань амплітуди двох спектральних ліній A_i ($0 \leq i \leq N$) при однакових експозиціях. За результатами цих вимірювань визначалося вибіркове середнє значення

$$A_m = \frac{\sum_{i=0}^N A_i}{N+1}, \quad (2.3)$$

і відносне відхилення Δ_i :

$$\Delta_i = \frac{A_i - A_m}{A_m}. \quad (2.4)$$

На Рис. 2.11 представлені в графічному вигляді відносні відхилення однократних вимірювань для лінії заліза 324.4 нм, виміряні з генератором УГЭ-4 (точками), і з генератором ЦУГ-2 (сходінками). Слід звернути увагу на більший розкид точок у порівнянні з розкидом поличок ступінчастої кривої. Для отримання чисельних характеристик обчислювалися моменти розподілів величини Δ_i [134]. Оскільки випадкова величина Δ_i є центрованою, центральний момент першого порядку для неї дорівнює нулю.

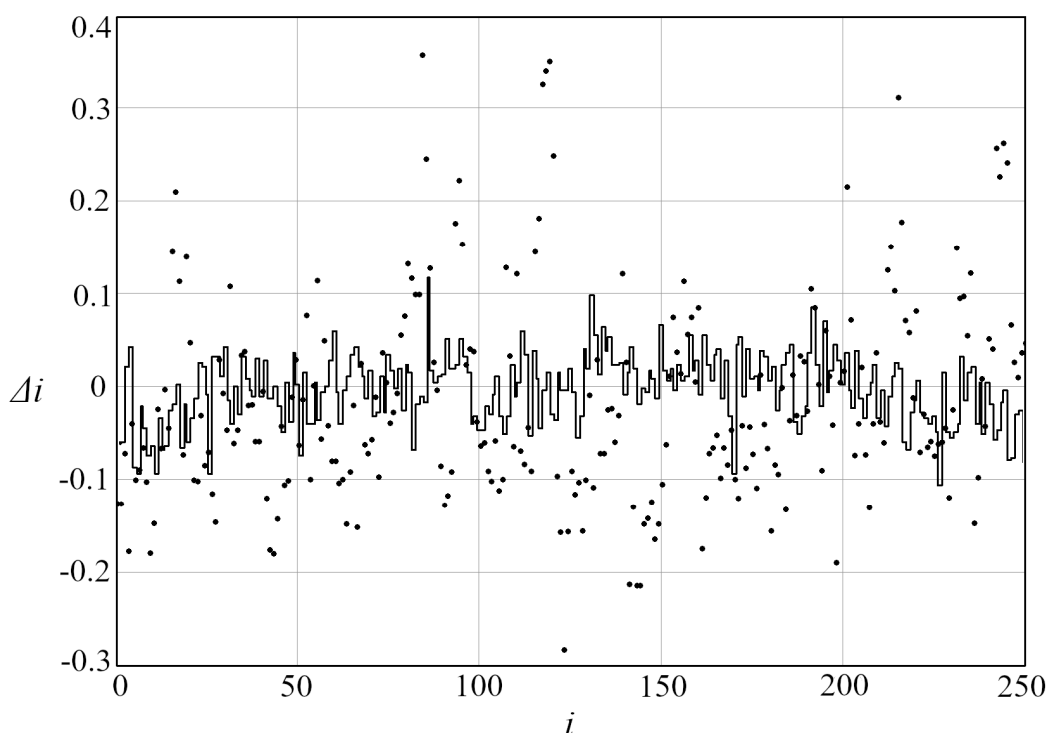


Рис. 2.11 Результати вимірювань розкиду вимірювань спектральної лінії Fe – 324,4 нм, одержані за допомогою генераторів УГЭ-4 (точки) і ЦУГ-2 (крива), i – порядковий номер вимірювання.

Другий центральний момент, який є характеристикою ступеня розсіювання результатів вимірювань (дисперсії), обчислюється через суму квадратів вибірових відхилень таким чином:

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_i \Delta_i^2, \quad (2.5)$$

де: N – загальна кількість відліків.

Для перевірки нормальності закону розподілу побудовано гістограми (Рис. 2.12). За критерієм Шовене [135] були виключені дані, що перевищують

З σ і побудовані гістограми (Рис. 2.12.) для перевірки нормальності закону розподілу.

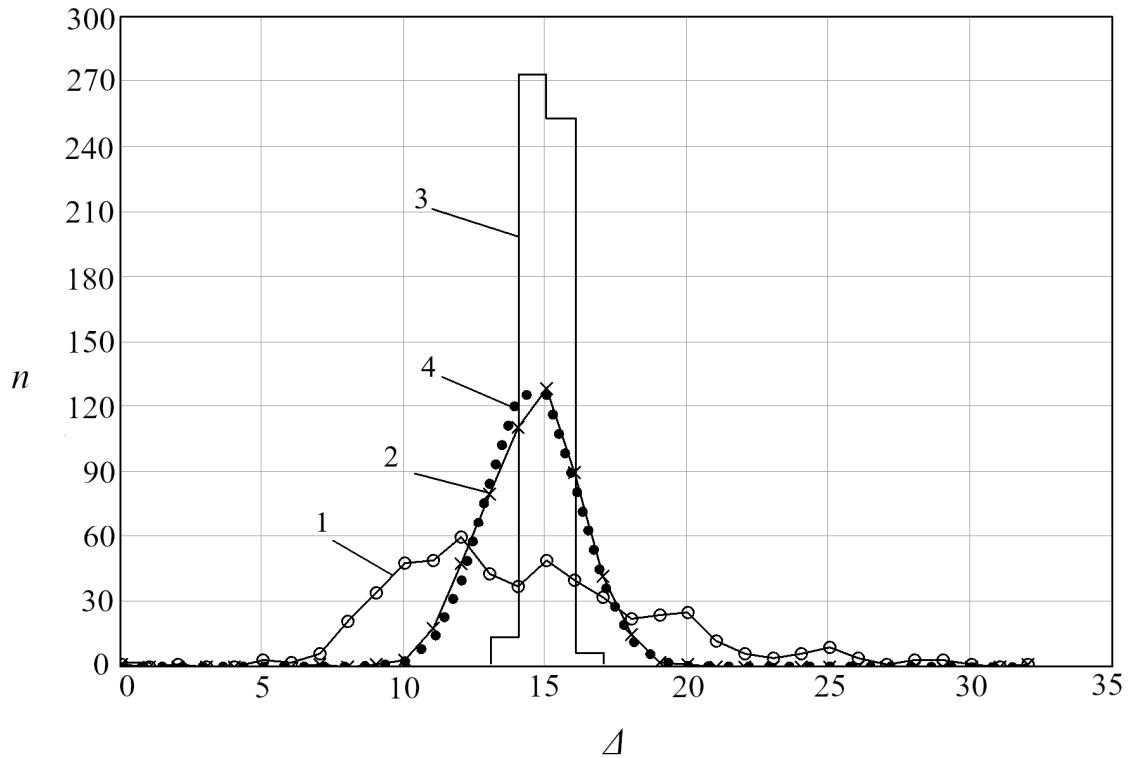


Рис. 2.12 Гістограми розподілів даних вимірювань Δ для генераторів УГЭ-4 (крива 1), ЦУГ-2 (крива 2), світлодіодного джерела випромінювання (крива 3) і нормального розподілу (крива 4). Дані масштабовані по площі під кривою розподілу.

З Рис. 2.12 випливає, що симетрія та ексцес розподілу вибірових даних, отриманих за допомогою генератора ЦУГ-2, набагато ближче до нормального, ніж даних, отриманих з використанням промислового генератора УГЭ-4. Особливо відрізняється затягнутий задній фронт гістограми для УГЭ-4. Він свідчить про рідкісні, але відносно великі позитивні викиди реєстрованого сигналу, які зазвичай спостерігаються під час повільних переміщень зображення плазмового факела по щілині спектрографа.

Строго кажучи, у зв'язку з відмінностями в законах розподілу, кількісні критерії вживати неправомірно, але при якісних оцінках перевага явно на

користь ЦУГ-2. Про це свідчить і порівняльна таблиця (табл. 2.3), де представлено чисельні вибіркові значення середньоквадратичного відхилення (СКВ) по експериментальному масиву даних розміром близько 500 вимірювань. Вони дорівнюють квадратному кореню з дисперсії D для двох спектральних ліній заліза ($\lambda = 321,9$ і $324,4$ нм).

Таблиця 2.3

Співвідношення між СКВ для генераторів ЦУГ-2 та УГЭ-4.

Генератор	СКВ		
	$\lambda=321,9$ нм	$\lambda=324,4$ нм	Середня СКВ
УГЭ-4	0,117	0,140	0,1285
ЦУГ-2	0,041	0,043	0,042
УГЭ-4 / ЦУГ-2	2,84	3,27	3,055

Отже, якщо припустити однаковий закон розподілу випадкової величини Δi для обох генераторів, то генератор ЦУГ-2 значно (більш ніж в 3 рази) перевершує за точністю УГЭ-4.

Висновки до розділу 2

1. Практика АЕСА потребує генераторів, з широким діапазоном регулювання параметрів збудження плазми в залежності від властивостей зразка, що аналізується і методик проведення аналізу. Використання стандартних схемотехнічних рішень не дозволяє отримати бажаний діапазон режимів збудження спектрів.

2. В результаті аналізу технічних рішень і їх подальшого розвитку, був створений генератор, що не поступається з метрологічних і експлуатаційних параметрів кращим закордонним зразкам. В процесі розробки генератора було знайдено кілька нових схемотехнічних рішень, таких як:

- Запропоновано схемне рішення формувача вихідного струму, побудованого за принципом потужного ЦАП з підсумовуванням струмів. Проведено аналіз статичних, динамічних і температурних характеристик декількох варіантів модулів джерел струму. Розроблено схемне рішення джерела струму, яке забезпечує поєднання статичної та температурної стабільності з високою швидкістю. Швидкість наростання струму в розряді була підвищена з 2.6 до 31 А/мкс, в порівнянні з базовою схемою.

- Розроблено і введено бустерний вузол, що забезпечує формування початкового імпульсу розрядного струму з максимальною амплітудою 150 А, – це істотно підвищує стабільність процесів пробовідбору і формування основного розряду.

- Розроблено конструкцію вузла високовольного пробою розрядного проміжку, яка має високу надійність і не вимагає періодичного обслуговування.

3. Порівняльні випробування генераторів свідчать про значне зростання точності аналізу при використанні генератора «ЦУГ-2». Так СКВ експериментальних даних з генератором ЦУГ-2 при роботі в реальних заводських умовах в три рази менше, ніж з генератором УГЭ-4.

4. Використання сучасної напівпровідникової та мікропроцесорної техніки дозволило створити дуговий генератор, що має високу економічність, (ККД генератора перевищує 80%), може працювати при значних коливаннях напруги в мережі живлення (від 160 до 250В), має розширені функціональні та сервісні можливості та значно поліпшені массо-габаритні характеристики.

Основні результати розділу опубліковані в роботі автора [11].

РОЗДІЛ 3

ОПТИЧНІ БЛОКИ СПЕКТРОМЕТРІВ

У розділі приведена конструкція і розрахунок оптичної схеми з увігнутими дифракційними ґратками [22] та варіанти схем зі схрещеною дисперсією [136]. Представлені результати розрахунків оптичних схем інструменту для побудови монохроматичних зображень протяжних об'єктів [13, 14, 137, 138, 139]. Запропоновано спосіб отримання субпіксельної роздільної здатності багатoelementних детекторів при реєстрації оптичних спектрів [8, 15].

3.1 Варіанти побудови оптичних блоків спектрометра

Оптичний блок спектрометра служить для просторового розкладання на спектральні складові оптичного випромінювання. Як правило, класичні оптичні спектрометри складаються з вхідної щілини, що обмежує вхідний пучок, коліматорного об'єктива, що формує паралельний пучок світла, диспергуючого елемента, і камерного об'єктива, який формує зображення спектра [75, 76, 77]. На Рис. 3.1 – приведена класифікаційна схема оптичних блоків спектрометрів.

Згідно з цією класифікацією в даному розділі не представлені дисперсійні оптичні блоки на основі призм. Розглянуто тільки дифракційні прилади з увігнутими та плоскими ґратками з застосуванням як лінзових, так і дзеркальних камер з одно- чи двохкоординатними детекторами. Для однокоординатних камер застосовувались лінійки фотодіодів ПЗЗ структури з декількома тисячами пікселів, - матричні детектори двохкоординатних камер мають аж до декілька мільйонів пікселів.

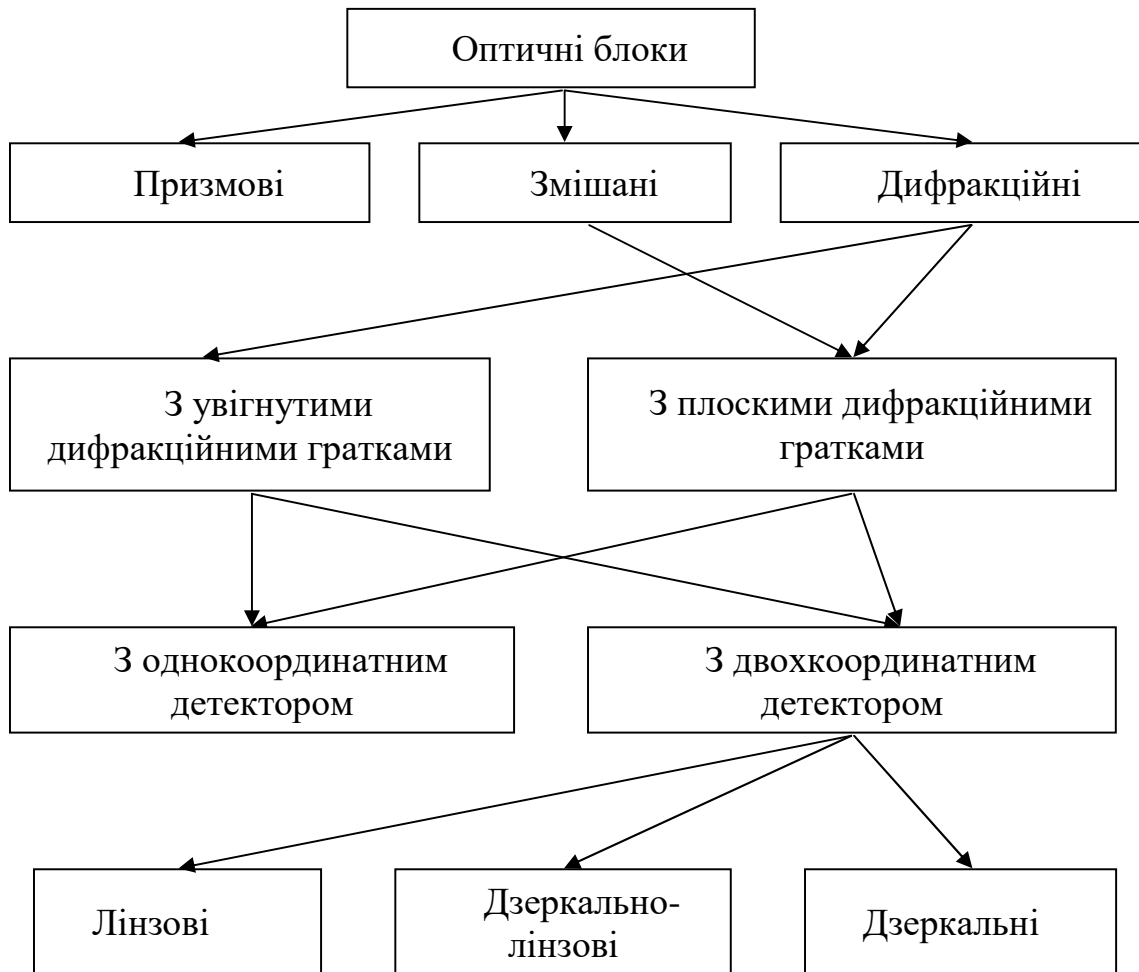


Рис. 3.1 Класифікаційна схема оптичних блоків спектрометрів

3.1.1 Спектрографи з увігнутими дифракційними ґратками

Залежно від форми поверхні ґратки дифракційні прилади поділяються на два типи – з плоскими та з увігнутими дифракційними ґратками. До переваг спектрографів з плоскою дифракційною ґраткою слід віднести можливість сканування спектру за рахунок повороту ґратки, до недоліків – більш складну оптичну схему з підвищеними оптичними втратами на дзеркальних поверхнях [86]. Прикладами таких інструментів можуть служити спектрографи типу ДФС-8, ДФС-452, [75, 76]. Оптичний блок з увігнутими дифракційними ґратками дуже простий тому, що в ньому диспергуючі й фокусуєчі функції виконує один дзеркальний елемент. У зв'язку з відсутністю коліматорного і камерного дзеркал, які потрібні при

використанні плоскої ґратки, втрати світла на відбиття зменшуються в кілька разів. Це дуже важливо в ультрафіолетовій області спектра, де відбивна здатність дзеркальних покриттів падає. Тому ця схема використовується в більшості спектрометрів, що працюють у вакуумному ультрафіолеті ($\lambda < 190\text{nm}$) [43]. Увігнута ґратка створює монохроматичні зображення щілини на фокальній поверхні, яка має форму кругового циліндра (коло Роуланда) [43, 89]. Така схема була прийнята за основу і пройшла апробацію в процесі виконання проєкту, основні наукові результати якого представлені в [22]. Оптична схема дисперсійного блоку зображена на Рис. 3.2.

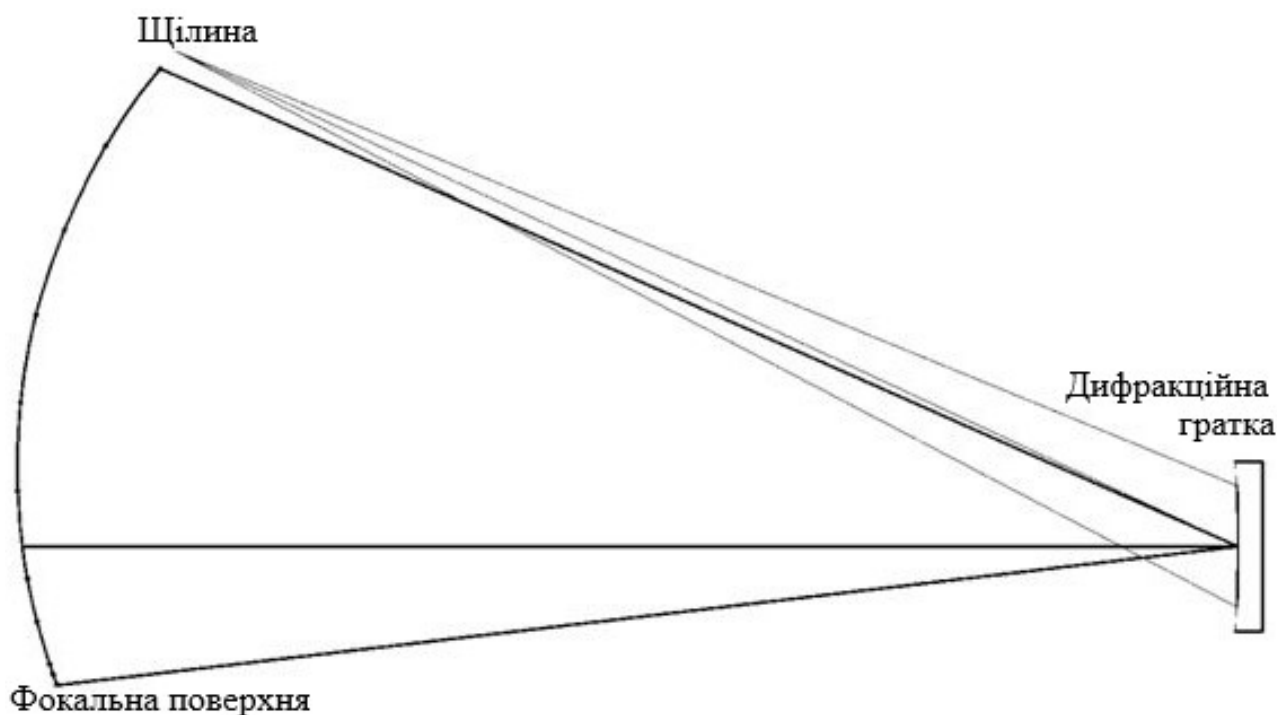


Рис. 3.2 Оптична схема дисперсійного блоку

Основні параметри блоку – спектральне розділення, спектральний діапазон, відносний отвір, пропускання світла – складним чином пов’язані один з одним і визначаються в основному характеристиками дифракційної ґратки.

Розрахунок дифракційної ґратки проводився з урахуванням концепції приладу в цілому для забезпечення узгодження спектрального діапазону приладу, спектрального розділення і розміру пікселя напівпровідникових фотоприймачів, а також технологічних можливостей її виготовлення. В якості базової була взята класична схема Пашена-Рунге з розташуванням

вхідної щілини й фотоприймачів на колі Роуланда [140]. Як було відзначено, така схема забезпечує максимальну простоту і мінімальну кількість відбиттів, а значить і втрат на поглинання і розсіювання світла, що особливо важливо для діапазону вакуумного ультрафіолету де, зазвичай, поглинання покриттів зі скороченням довжини хвилі зростає. При верифікації розрахунків використовувався пакет оптичного моделювання Zemax [141]. Розрахунки показали, що класична нарізна дифракційна ґратка забезпечує дифракційну роздільну здатність тільки при діаметрі кола Роуланда більше метра і світлосилі $1/20$ і менше. Для того щоб забезпечити помірні габарити приладу і високу світлосилу, були розглянуті варіанти голографічних і нарізних дифракційних ґраток з виправленими абераціями [87, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149]. В результаті була запропонована і розрахована нарізна увігнута дифракційна ґратка зі змінним кроком нарізки й криволінійними штрихами.

Для приладу була обрана дифракційна ґратка з наступними характеристиками:

- розмір ґратки – 40 x 50 мм;
- радіус кривизни поверхні ґратки – 500 мм;
- кількість штрихів на 1 мм ~ 1 800;
- відносний отвір ~ 1:10;
- дисперсія ~ 11 Å / мм;
- спектральний діапазон – 1 700 – 4 500 Å;
- розрахунковий розмір пікселя фотодетектора – 8 x 200 мкм.

Результати верифікації розрахунків з використанням системи оптичного моделювання Zemax наведені в табл. 3.1

Результати моделювання увігнутої дифракційної ґратки з виправленими аберациями.

Довжина хвилі	Координати на фокальній кривій X, Y (мм)		Розмір зображення точкового джерела (мкм)	
λ nm	X mm	Y mm	Rx мкм	Ry мкм
580	-342.33	271.5	1641	31.7
540	-381.728	250.98	908.2	14.7
500	-415.41	225.68	334	4.6
SLIT *	-437.2	203.87		
460	-443.4	196.6	87.8	1.05
420	-465.82	164.72	366.3	3.85
380	-482.81	130.74	516	4.58
340	-494.44	95.36	528	4.61
300	-500.78	59.2	421	3.5
260	-501.92	22.8	198	1.6
220	-497.924	-13.26	137	1.1
200	-494.02	-30.99	343	2.81
180	-488.845	-48.4	578	4.82
175	-487.37	-52.76	639	5.36
170	-485.79	-57.042	740	5.9

* SLIT координати вхідної щілини

Світлосила по площі заштрихованої поверхні 1 : 10.78, по діагоналі заштрихованої області 1 : 7.53 (визначає світлосилу освітлювальної оптики). Дисперсія: 11 Å / mm (~ 280 nm) або 0.154 Å / піксель (для сенсора з розміром пікселя 14 мкм) або 0.088 Å / піксель (для сенсора з пікселем 8 мкм).

В табл. 3.2 наведені порівняльні характеристики ґратки що пропонується, та класичних ґраток Роуланда з фокусною відстанню 500 мм і 1000 мм.

Таблиця 3.2

Результати моделювання увігнутої дифракційної ґратки з виправленими аберациями та класичних ґраток Роуланда з фокусною відстанню 500 мм і 1000 мм

Оптична схема / Розмір зображення точкового джерела (мкм)						
	500 mm_Corrected		500 mm_Rowland		1000 mm_Rowland	
λ nm	Rx мкм	Ry мкм	Rx мкм	Ry мкм	Rx мкм	Ry мкм
460	87.8	1.05				
420	366.3	3.85	4942.1	7.25	2278.5	2.2
380	516	4.58	4674.2	22.4	2116.3	4.9
340	528	4.61	4512.9	37.4	2019.0	7.8
300	421	3.5	4458.8	51.2	1986.8	10.5
260	198	1.6	4512.2	64.2	2019.5	13.2
220	137	1.1	4672.8	76.9	2117.2	16.1
200	343	2.81	4793.1	83.4	2190.4	17.5
180	578	4.82	4939.9	89.9	2280.1	19.1
175	639	5.36				
170	740	5.9				

Результати розрахунку показують, що класична увігнута дифракційна ґратка, з такою самою фокусною відстанню – 500 мм, має більш ніж в десять разів більший астигматизм (Rx) і викривлення пов'язані з кривизною зображення (Ry), що зумовлює недостатню якість для її використанні в АЕСА. Якщо збільшити фокусну відстань у два рази до 1000 мм і залишити розмір ґратки фіксованим, що приведе до зменшення оптичної потужності спектрометра в чотири рази, якість зображення стає більш прийнятною хоча в короткохвильовій частині спектру все ще сильно поступається скорегованому варіанту.

На базі скорегованої ґратки в рамках виконання інноваційного проєкту НАН України був розроблений і виготовлений спектрометр, зовнішній вигляд якого зображений на Рис. 3.3 [22].



Рис. 3.3 Зовнішній вигляд спектрометра [22]

Керування спектрометром здійснюється, в основному, з клавіатури комп'ютера. На передню панель винесені тільки органи керування і контролю газової автоматики. Блок газової автоматики забезпечує стабільну подачу аргону для продувки електродного блоку і заповнення оптичного блоку. У верхній частині приладу видно притискний пристрій електродного блоку для закріплення вручну досліджуваних зразків [22].

3.1.2 Спектрографи зі схрещеною дисперсією

Представлений в попередньому підрозділі оптичний блок має прийнятні для проведення атомно-емісійного аналізу характеристики. Головним недоліком цього приладу є дещо громіздкий детекторний блок, що складається з десятка багатoelementних фотодіодних детекторів лінійної структури (фоточутливих лінійок).

Кількість пікселів поширених типів фотодіодних лінійок становить від 1024 до 3648. На даний час при наукових дослідженнях, а також у відеокамерах і фотоапаратах широко застосовуються двовимірні фотодетектори – матриці. Вони мають на два-три порядки більше пікселів, тому перехід на матричний фотодетектор відкриває перспективу значного

збільшення інформативності детектора і спрощення розробки електронної апаратури реєстрації зображень. Для переходу на матричний приймач необхідно здійснювати двовимірне перетворення спектра. Зазвичай це робиться двома ортогонально спрямованими дисперсійними елементами за схемою зі схрещеною дисперсією. Одна з розробок такого спектрометра Mechelle ME5000 здійснена фірмою ANDOR [150]. На Рис. 3.4 представлений зовнішній вигляд і оптична схема спектрометра, а на Рис. 3.5. вид спектра на виході такого спектрометра.

Слід відзначити широкий спектральний діапазон 200–950nm, високу роздільну здатність і відносно невеликі габарити спектрометра (фокусна відстань приладу = 195 мм.). До недоліків можна віднести складність оптичної схеми. Впадає в очі велика нерівномірність проходження порядків (по вертикалі), яка обумовлена нелінійностями показника заломлення призмового роздільника порядків. Числові розрахунки для кварцевої призми свідчать про те, що відстань між сусідніми порядками в короткохвильовій області в 4.5 рази більше, ніж в довгохвильовій. Аналогічний показник для дифракційного роздільника більш ніж у два рази менший і має зворотний знак. Тому краще використовувати дифракційний роздільник порядків.

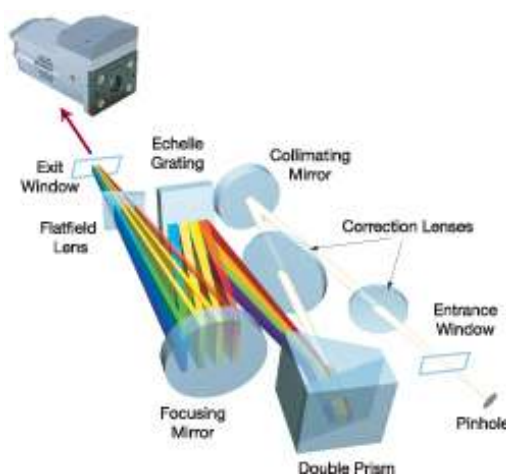


Рис. 3.4 Зовнішній вигляд і оптична схема спектрометра Mechelle ME5000 [150]

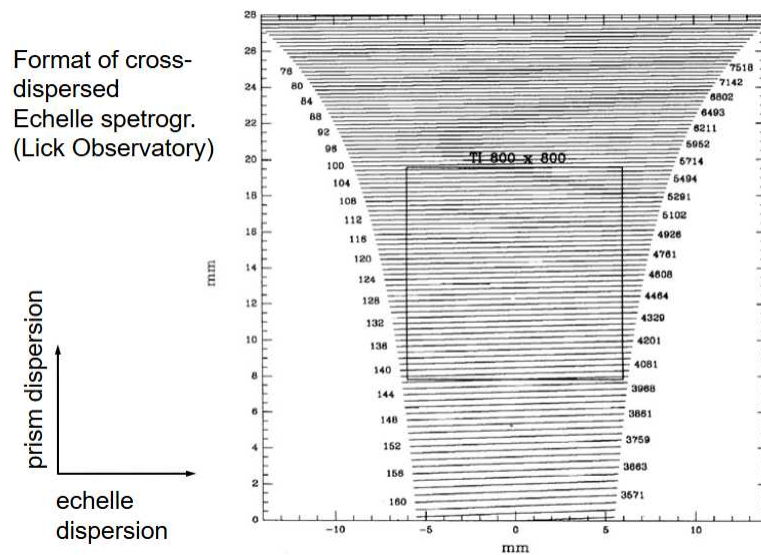


Рис. 3.5 Спектр на виході спектрометра зі схрещеною дисперсією [150]

З огляду на викладені міркування, було прийнято рішення розробити два варіанти оптичного блоку – з лінзовою і дзеркальною камерами. Схематичне зображення варіанту з лінзовою камерою представлено на Рис. 3.6.

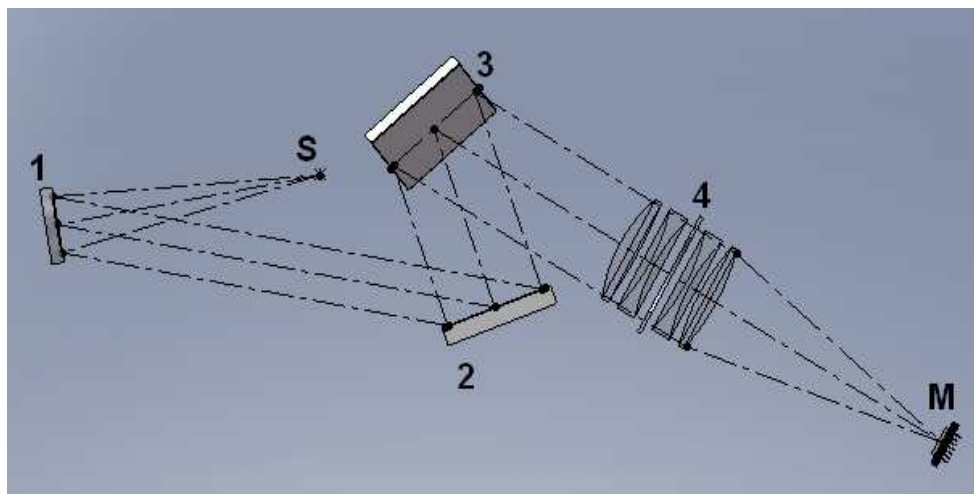


Рис. 3.6 Схема оптичного блоку з лінзовою камерою: 1 – коліматор; S – джерело світла; 2 і 3 диспергуючий двокоординатний вузол; 4 – об'єктив камери, M – детекторна матриця [136].

Коліматор перетворює світловий пучок, що розходиться від джерела в паралельний, який направляється на диспергуючий двокоординатний вузол, а потім за допомогою камери створюється двовимірне зображення спектра на поверхні детекторної матриці.

Вихідні дані для проєктування наступні:

- Дифракційна ґратка роздільника порядків (2) має 300 шт / мм, максимум відбиття в напрямку 300 нм.
- Дифракційна ґратка ешелле (3) має 79 шт / мм, кут блиску 63° , розмір 25 x 50 мм.
- Реєструюча, матриця М типу TC241 (Texas Instruments), завдяки особливостям технології виготовлення може використовуватися в ультрафіолетовому діапазоні. Матриця має 754 пікселі уздовж рядка і 244 – уздовж стовпчика; розмір пікселя по горизонталі – 11.5 мкм, по вертикалі – 27 мкм. Розмір фоточутливої частини матриці: 8.67x6.59 мм. [151].

Цих даних достатньо, щоб визначити максимально досяжну світлосилу і спектральний діапазон розробленого спектрометра [89].

Визначимо межі діапазону. За короткохвильову межу, з міркувань пов'язаних з поглинаючими властивостями атмосфери, візьмемо значення 200 нм. Для коректної роботи смуга роздільника порядків не повинна істотно перекривати октаву. Тобто довгохвильовий кінець діапазону повинен бути поблизу 400 нм.

З іншого боку, цей спектральний діапазон в лінійній мірі не повинен перевищувати вертикальний розмір детекторної матриці, який в нашому випадку становить 6.59 мм (в напрямку розподілу порядків). Моделювання оптичної схеми з цими даними дає нам величину фокусної відстані камерної частини оптичного блоку, яку можна округлити до 100 мм. Уточнений розрахунок свідчить про те, що при фокусній відстані камери 100 мм, дифракційній ґратці 300 штрихів на міліметр, лінійному розмірі детекторної матриці 6.59мм спектральний діапазон роздільника порядків становитиме від 200 нм до 420 нм. Це дозволить перекрити найбільш вживану частину спектрального діапазону АЕСА металів і сплавів.

Крім цього потрібно забезпечити перекриття спектрів сусідніх порядків так, щоб кінець n -го порядку відтворювався на початку $(n + 1)$ -го порядку. Тоді весь спектральний діапазон буде реєструватися без пропусків, як це

представлено на Рис. 3.5. Моделювання було виконано з допомогою програмних пакетів для проєктування оптичних елементів. Оцінювання по другій координаті висуває обмеження на максимальну довжину хвилі, при якій забезпечується перекриття порядків [89]. При наших вихідних даних вона дорівнює 540 нм при роботі в 40–м порядку, що на 120 нм більше обмеження роздільника порядків. При необхідності цей надлишок можна використовувати надалі для розширення спектрального діапазону в бік довших хвиль, що покращить умови проведення аналізів лужних металів які мають чутливі лінії в більш довгохвильовій області спектру.

Таким чином, при прийнятих вихідних даних для проєктування спектрометра, камера може мати світлосилу $A = 1/4$, фокусну відстань – близько 100 мм, спектральний діапазон від 200 нм до 420 нм (центральна довжина хвилі 310 нм). Лінійний розмір дифракційного зображення світної точки (радіус кільця Airy) визначається довжиною хвилі та світлосилою зображувальної системи. Він не залежить від оптичної схеми об'єктива і становить для довжини хвилі 420 нм близько 2–х мікрон, а для 200 нм – у два рази менше. Цей розмір узгоджується з величиною пікселя детектора, що зазвичай не перевищує декількох мікрон. В оптимально спроектованому спектрометрі дифракційне розділення камери повинно відповідати спектральному розділенню дифракційної ґратки. Ґратка в змозі розділити дві спектральні лінії, довжини хвиль яких відрізняються на деяку величину $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \lambda / R, \quad (3.1)$$

де λ – робоча довжина хвилі, R – роздільна сила ґратки, рівна:

$$R = n \cdot N. \quad (3.2)$$

Роздільна сила ґратки R залежить тільки від загальної кількості штрихів на ґратці N і номера порядку спектра n . Для нашої ґратки ешелле при довжині хвилі 420 нм робочим є 53–й порядок, отже, $R \approx 2 \cdot 10^5$. З укороченням довжини хвилі номер робочого порядку зростає, і величина R залишається незмінною. Прийняті технічні рішення забезпечують можливість узгодженого функціонування всіх елементів спектрометра.

Чисельне моделювання свідчить про збіг лінійної величини спектрального розділення з розмірами кільця Airy, який для $\lambda = 2000 \text{ \AA}$ нм при світлосилі 1/4 дорівнює одному мікрону. Біля довгохвильового кінця діапазону ($\lambda = 4200 \text{ \AA}$) величина $\Delta\lambda = 0.02 \text{ \AA}$, а близько короткохвильового $\Delta\lambda = 0.01 \text{ \AA}$. Для реалізації такого розділення детекторна матриця повинна мати розмір пікселя не 11.5 мкм, як в нашому випадку, а на порядок менше. Метод розв'язання цієї проблеми описаний в підрозділі 3.3, де представлений алгоритм отримання субпіксельного розділення.

Найбільш відповідальним і трудомістким в розрахунках і виготовленні є об'єктив камери оптичного блоку. Він розраховується таким чином, щоб звести його аберації до мінімуму. Величина аберацій залежить від світлосили A і кута нахилу Ω оптичного пучка до осі. Більшості зображуючих оптичних систем властиві такі чотири основні аберації:

1. сферична (зональна) $\sim A^3$;
2. кома $\sim A^2 \cdot \Omega$;
3. астигматизм $\sim A \cdot \Omega^2$;
4. хроматизм $\sim \Omega^3$.

Вони вичерпують всі можливі поєднання добутку $A^k \cdot \Omega^l$, при яких $k + l = 3$, і тому називаються абераціями третього порядку [86]. Представлений на Рис. 3.6 лінзовий об'єктив камери (4) побудований за типом поширеного об'єктива Индустар (Tessar). Матеріал першої й останньої лінзи – флюорит (CAF₂), другий і третій компоненти – кварц (SILICA). Це забезпечує пропускання до 200нм. Про якість зображення, отриманого за допомогою такого об'єктива можна судити по діаграмах розсіювання для точкового джерела (SPOT DIAGRAM), що представлені на Рис. 3.7 і Рис. 3.8. Середньоквадратична величина радіального розміру плями розсіювання (RMS) для центрального променя становить 1.19мкм, а для периферичного 2.235 мкм. Це дещо більше радіуса кільця Airy (1.725 мкм), але є допустимим, тому що не виходить за розміри пікселя (11.5 мкм). Ці числові характеристики отримані для монохроматичного світла з $\lambda = 310 \text{ нм}$. В

реальних умовах камера працює в широкому спектральному діапазоні від 200 нм до 420 нм. При цьому спостерігається хроматичне зміщення фокусу близько двох міліметрів, який в деякій мірі може бути компенсованим нахилом матриці М.

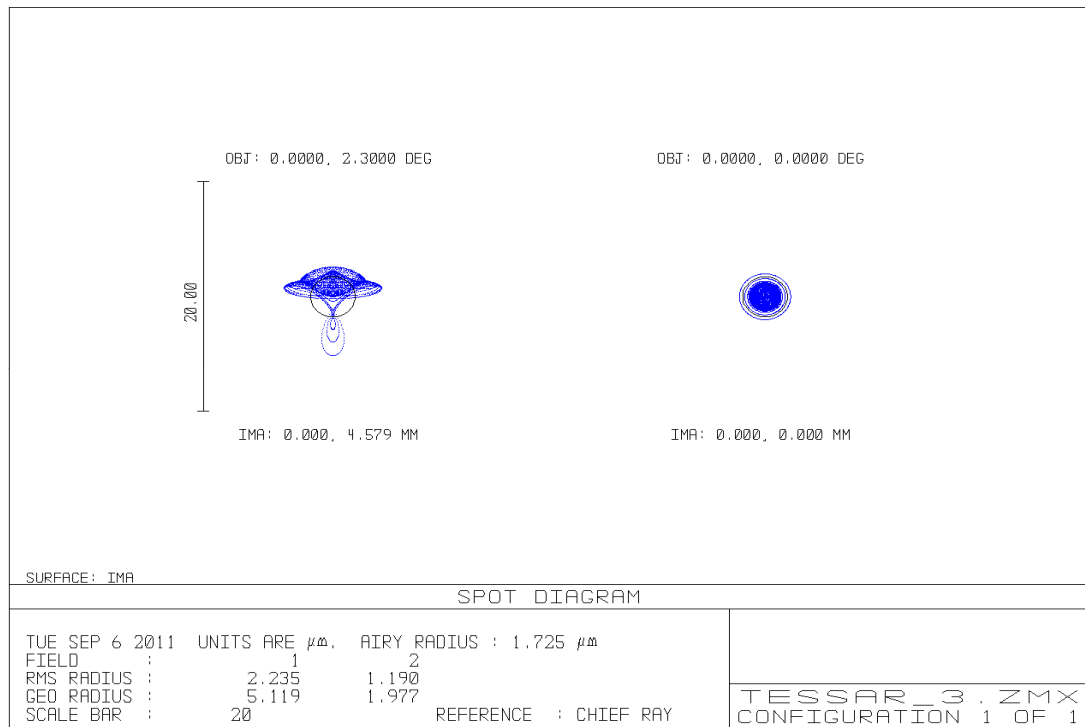


Рис. 3.7 Діаграми розсіювання точки об'єктивом Tessar.

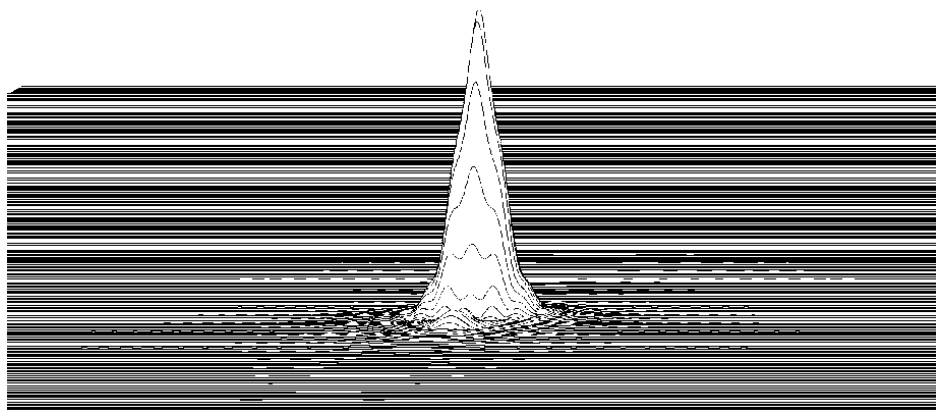


Рис. 3.8 Діаграма розсіювання точки об'єктивом Tessar для косого пучка (2.3°)

Негативними властивостями цього об'єктива є складність виготовлення, великі втрати (близько 50 %) на віддзеркаленні від великої кількості поверхонь лінз, і наявність нелінійної хроматичної аберації.

У зв'язку з труднощами виготовлення лінзової оптики був створений макет дисперсійного блоку подібної схеми з використанням об'єктивів заводського виготовлення. Для ілюстрації його роботи на Рис. 3.9 зображений отриманий з його допомогою спектр неоновій лампи типу ТМН у видимому діапазоні.

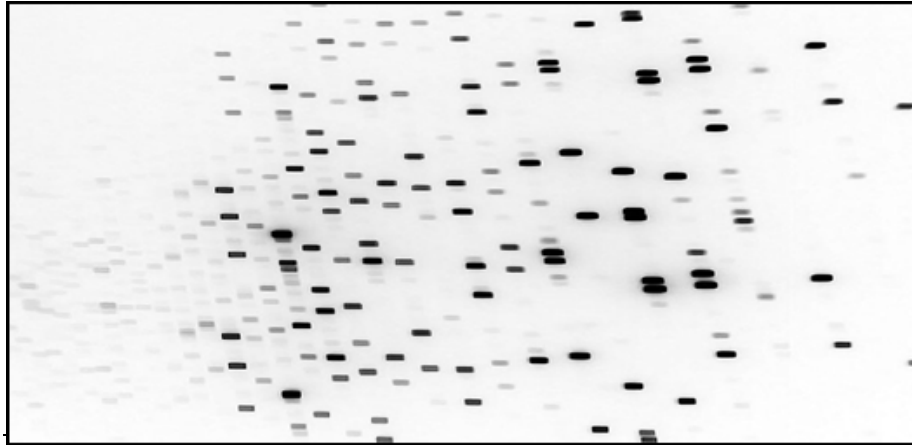


Рис. 3.9 Вид спектру лампи ТМН, отриманий в спектрометрі зі схрещеною дисперсією при дифракційному поділі порядків. По вертикалі – довжина хвилі всередині порядку, по горизонталі – № порядку

Дещо кращі характеристики має дзеркальна камера, що представлена на Рис. 3.10.

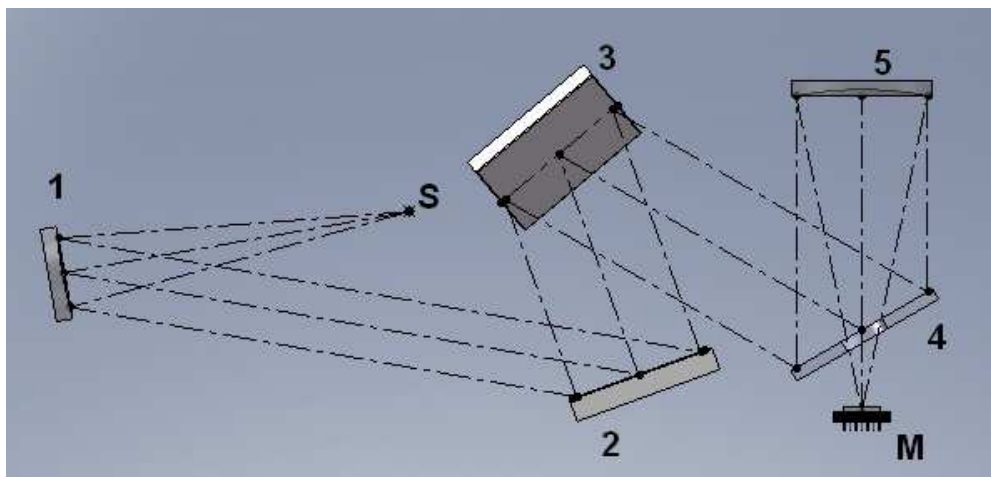


Рис. 3.10 Схема оптичного блоку із дзеркальною камерою: 1 – коліматорне дзеркало; 2 – плоске дзеркало; 4 – плоске дзеркало з центральним отвором; 5 – камерне сферичне дзеркало з центром кривизни в районі ґратки ешелле 3, М – матриця детектора [136]

Якщо ґратку ешелле (3) розмістити в центрі кривизни камерного дзеркала (5), то така оптична схема реалізує відому ширококутову камеру Шмідта [86, 89]. Корекція хвильового фронту в такій камері здійснюється дзеркалом з гіперболічною формою поверхні. Діаграми розсіювання точки таким об'єктивом представлені на Рис. 3.11.

Радіуси RMS (root-mean-square) в цьому випадку набагато менше, ніж для лінзової камери – як для осового пучка (0.029 мкм), так і для периферичного (0.108 мкм) і значно менші в порівнянні з дифракційним радіусом, який становить 1.018 мкм для $\lambda = 310$ нм. Як будь-яка дзеркальна оптика вона вільна від хроматичної аберації.

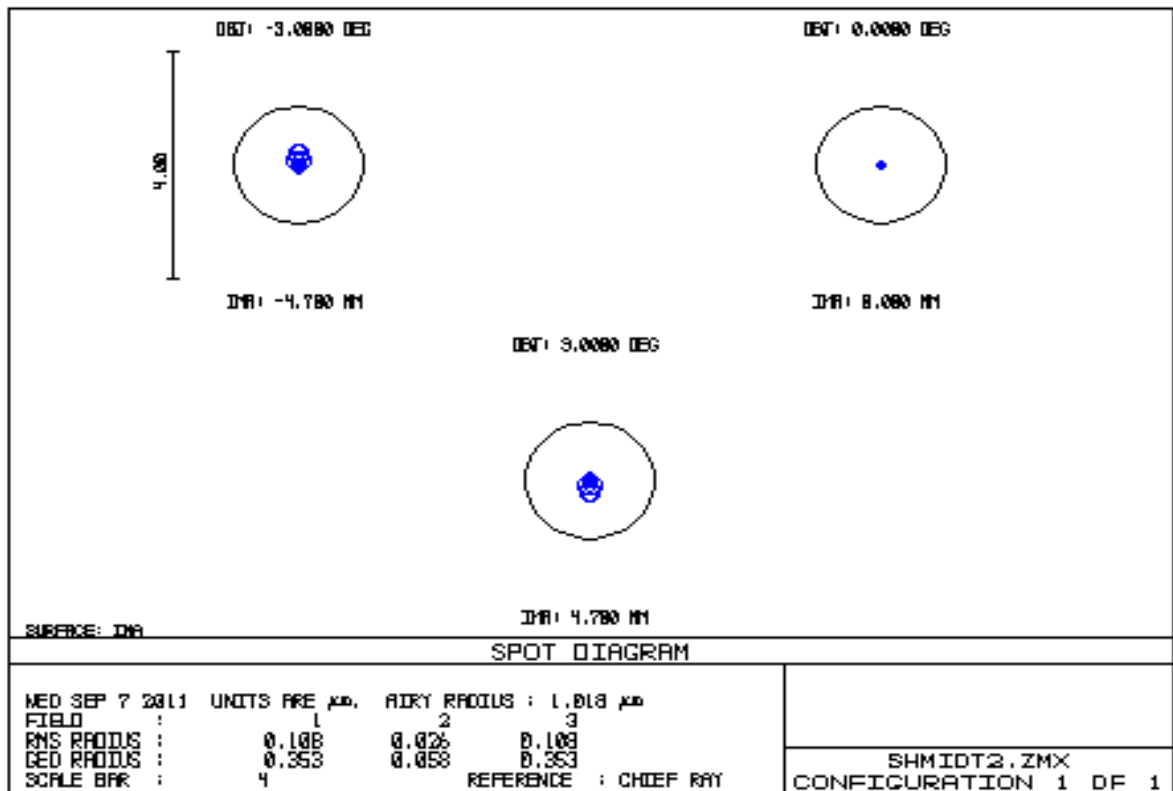


Рис. 3.11 Діаграми розсіювання точки дзеркальною камерою Шмідта

В результаті наведеного розгляду можна зробити висновок про те, що оптимальним є оптичний блок дифракційного типу з плоскою дифракційною ґраткою, що має дзеркальну камеру з матричним детектором.

Якщо взяти до уваги природну ширину спектральних ліній розігрітої плазми, то така роздільна здатність оптики спектрометра може показатися дещо надлишковою. Проте, часто виникають проблеми при наукових і інструментальних дослідженнях, коли роздільної здатності не буває забагато. Наприклад, для прецизійного контролю стабільності частотної шкали інструмента було б доцільно в досліджуваний спектр підмішувати декілька лазерних ліній. Такий простий засіб відкриває можливості контролю багатьох інструментальних параметрів з інтерферометричною точністю без великих апаратних затрат. Може бути доцільним використання оптики з розрідженою й аподизованою апертурою. Ці перспективи розглядалися автором в роботі [25] при аналізі астрономічних зображень екзопланет у віддалених зоряних системах. Фізично й алгоритмічно задача виявлення слабкої екзопланети рядом з віддаленою яскравою зіркою мало чим відрізняється від задачі виявлення слабого спектрального супутника на фоні яскравої лінії.

3.2 Монохроматизація двовимірних зображень об'єктів

У попередніх двох підрозділах були розглянуті технічні рішення та апаратура для побудови спектрів точкових ділянок зображень плазмових утворень. При проведенні досліджень в астрономії, фізиці плазми та деяких промислових застосуваннях часто виникає задача отримання монохроматичних двовимірних зображень об'єктів. Одним з варіантів її вирішення є використання скляних і інтерференційних оптичних фільтрів. Зазвичай такі фільтри створюються на фіксовану довжину хвилі, що обмежує сферу їх застосування. В астрономічній практиці для розв'язання цієї проблеми до телескопа пристиковується спектрограф з узгодженою механічною системою сканування на вході й на виході. Таке поєднання телескопа і спектрографа називається спектрогеліограф [152]. Воно дозволяє отримувати монохроматичні зображення Сонця на будь-якій довжині хвилі.

Це зображення можна розглядати оком або зафіксувати на фотографічній плівці. Використання для детектування зображень широко поширених на даний час твердотілих матричних детекторів дозволяє значно спростити механічну систему узгодженого сканування. Такий інструмент може використовуватися не тільки для астрономічних застосувань, але і при лабораторних дослідженнях плазових утворень як високотемпературної, так і низькотемпературної плазми. Останнім часом плазма широко застосовується в промисловості, медицині, а також при ядерних та радіофізичних дослідженнях. В роботах [10, 20] з участю автора досліджувалась можливість застосування низькотемпературних плазових утворень в радіофізиці при розробці плазових антен. Роботами по розробці спектрогеліографа автор займався в рамках проєту Українського науково-технологічного центру Uzb-54(J) [13, 14, 137, 138, 139].

3.2.1 Оптична схема спектрогеліографа

Схема спектрогеліографа зображена на Рис. 3.12.

Телескоп представлений двома дзеркалами M1 і M2, в площині вхідної щілини спектрографа формується зображення Сонця. В процесі роботи поворотом дзеркала M1 зображення Сонця може переміщатися по щілині.

Час одного такого сканування задається частотою покрокового приводу дзеркала M1 і становить 20 секунд і більше. Зменшувати час експозиції кадру не має особливого сенсу тому, що процеси на Сонці відбуваються повільно, обсяг інформації великий, а швидкість зчитування доволі обмежена.

Схему телескопа можна класифікувати як дзеркальний варіант камери Райта. Світловий потік від Сонця спрямовується на коригувальну пластину M1, що має дзеркальну оптичну поверхню четвертого порядку. Відбите від неї світло направляється на сплюснутий сфероїд M2, який створює зображення Сонця через отвір в корегувальній пластині за межами труби телескопа.

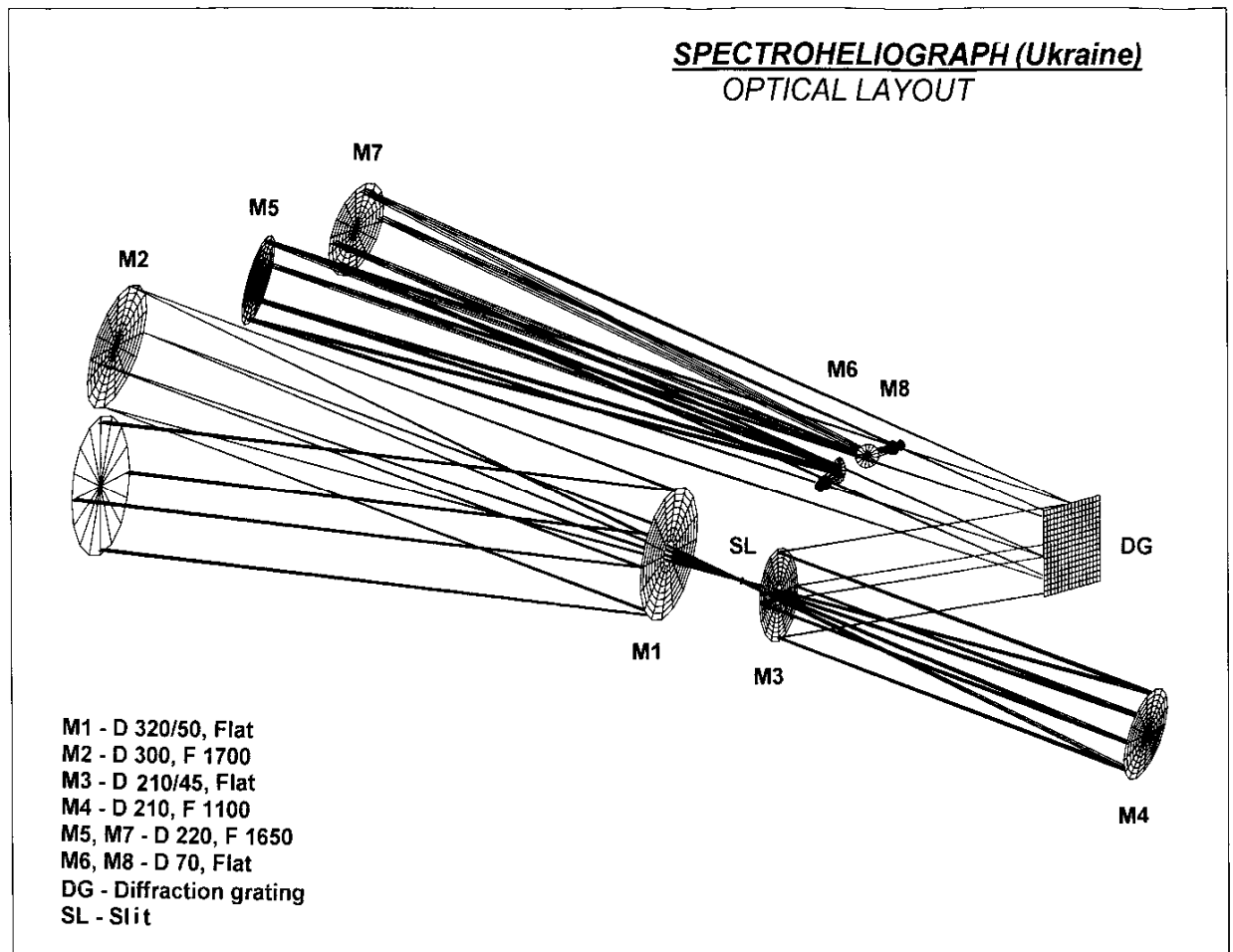


Рис. 3.12 Оптична схема спектрогеліографа. M1 – коригувальна пластина, M2 – об’єктив телескопа, M3, M4 – дзеркала коліматора, M5, M7 – дзеркала камери, M6, M8 – діагональні плоскі дзеркала, DG – дифракційна ґратка, SL – вхідна щілина спектрографа [137]

Така оптична схема, по-перше, позбавлена хроматизму і, по-друге, не має діагонального дзеркала всередині труби телескопа. Обидва дзеркала мають великі розміри, обумовлені апертурою, і знаходяться на кінцях труби телескопа. Таке розташування дзеркал дозволяє організувати їх охолодження застосуванням витяжної вентиляції, що має важливе значення при спостереженнях Сонця. Фокальна площина, де розташовується вхідна щілина спектрографа SL, також має зручне для охолодження розташування.

Розрахункові аберації не перевищують розмірів кільця Ейрі навіть для короткохвильового кінця спектра. Розрахунки проведені для телескопа діаметром 300 мм світлосилою 1/8. Корекційна пластина M1 в діаметральному перетині є кривою четвертого порядку з максимальним

відхиленням від площини 1,15 мкм. Пластина має центральний отвір діаметром 60 мм. Діаметр отвору перевищує діаметр зображення Сонця. Це пов'язано з необхідністю сканування сонячного диска щілиною спектрографа. Центральне екранування, пов'язане з наявністю отвору в корегувальній пластині, не перевищує 4%.

3.2.2. Оптична схема спектрографа

Для отримання монохроматичних зображень сонячного диска, оптика спектрографа повинна забезпечувати кутове розділення $\leq 1''$ і спектральне розділення $0,1\text{\AA}$ в діапазоні 390 – 1083 нм. Кутове розділення лімітується нестабільністю земної атмосфери, а спектральне – обумовлене природною шириною спектральних ліній в умовах сонячної фотосфери. Основна особливість спектрографа в складі спектрогеліографа полягає в тому, що він повинен мати високе розділення і в спектральному, і в просторовому вимірах одночасно. Це значно ускладнює розрахунок і конструювання оптичної схеми спектрографа. Схема спектрографа представлена на Рис. 3.12. Він складається з вхідної щілини SL, коліматора – дзеркала M3 і M4, дифракційної ґратки – DG і двох камер, що знаходяться в одному блоці з діагональними дзеркалами M6 та M8.

Попередні розрахунки оптичної схеми спектрографа, який є складовою частиною інструменту, показують, що його оптичні аберації можуть бути зведені до величин менших величини дифракційного порогу розсіювання. При виконанні цієї умови спектральне розділення спектрографа лімітується роздільною силою його диспергуючого елемента, а кутове розділення дифракційними явищами й залежить від апертури телескопа. Як диспергуючий елемент використовується дифракційна ґратка DG. Її роздільна сила пропорційна загальній кількості штрихів помноженій на номер порядку спектра. При ґратці розміром 150 мм реально отримати для довжини хвилі 1 мкм в першому порядку розділення близько $0,1\text{\AA}$. Цього достатньо для організації спостережень зображення Сонця одночасно у двох спектральних лініях – лінії водню H_{α} та інфрачервоній лінії гелію $He I$.

3.2.3 Оптична схема коліматора

Коліматор перетворює розбіжний від щілини пучок світла в паралельний і направляє його на дифракційну ґратку. Він складається з трьох плоских дзеркал (М3, М5 і М6) та двох увігнутих (М4 і М7) Рис. 3.12. Плоскі дзеркала виконують допоміжну функцію по перекиданню зображення щілини. На двох увігнутих дзеркалах реалізована система Грегорі. Позитивний мотив застосування системи Грегорі полягає в тому, що з чотирьох увігнутих дзеркал спектрографа тільки одне дзеркало М4 має складну еліпсоїдальну форму з асферичністю 3,38 мкм. Всі інші дзеркала мають найпростішу сферичну форму. Дифракційна ґратка G плоска. Вона має 600 штрихів на міліметр. Кут блиску такий, що максимум енергії відбивається в напрямку довжини хвилі 1 мкм.

3.2.4 Оптична схема камери спектрографа

Світло відбивається від дифракційної ґратки під різними кутами в залежності від довжини хвилі. Повертаючи ґратку кроковим приводом, можна направляти в камеру потрібну ділянку спектрального діапазону. Особливо інформативними спектральними лініями для ведення служби Сонця є лінії водню H_{α} ($\lambda=0,6563$ мкм) і інфрачервона лінія гелію $He I$ ($\lambda = 1,083$ мкм). По зображеннях в цих лініях визначають інтенсивність і конфігурацію спалахів на Сонці, що має безпосередній вплив на прогнозування сонячної активності. Зважаючи на важливість цих ліній було прийнято рішення розробляти двокамерний спектрограф. Він має таке розташування камер, що при наведенні однієї з камер на лінію H_{α} , друга виявляється автоматично налаштована на інфрачервону лінію гелію ($\lambda = 1,083$ мкм). Цим досягається одночасність спостереження Сонця в цих двох лініях. При всіх інших положеннях ґратки спектрограф працює як однокамерний. Камери розташовуються симетрично щодо коліматора. У зв'язку з тим, що камера з плоскою дифракційною ґраткою буде викривлені зображення спектральних ліній необхідно цю кривизну враховувати при складанні програми обробки даних. Кривизна спектральних ліній

обумовлюється чисто інтерференційним ефектом і для автоколімаційної схеми дорівнює:

$$R = f / 2 \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.3)$$

де R – радіус кривизни спектральної лінії,

f – фокусна відстань камерного об’єктива (2,4 м),

φ – кут між перпендикуляром до ґратки й напрямком на зображення спектральної лінії [89].

Для дифракційної ґратки, що має частоту штрихів 600/мм, при довжині хвилі близько 1 мкм кут $\varphi = 19^\circ$ і $\operatorname{tg} \varphi = 0,34$. При цих даних для прийнятої нами фокусної відстані камери спектрографа 2,4 м радіус кривизни спектральної лінії буде дорівнювати 3,63 м. При такому радіусі кривизни спектральної лінії стрілка прогину на діаметрі зображення Сонця досягає 20 мкм. Це в кілька разів перевищує типовий розмір пікселя ПЗЗ камери. Використання викривленої вхідної щілини для компенсації кривизни спектральної лінії в нашому випадку неможливо, тому що наш спектрограф є широкодіапазонним приладом. При переході на іншу довжину хвилі повертається ґратка, при цьому змінюється кут φ , а з ним і кривизна спектральних ліній. Тому компенсація ефекту викривлення лінії покладена на програму обробки даних матричного фотодетектора.

Компоновка спектрогеліографа представлена на фотографії Рис. 3.13. Для наочності знята зовнішня обшивка приладу.

В процесі випробувань розробленого спектрогеліографа були досліджені інтерферограми всіх оптичних елементів та приладу в цілому. Після лабораторних випробувань згідно з умовами проекту УНТЦ Uzb54(J) інструмент був переданий в Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в відділ фізики Сонця, Місяця та планет.



Рис. 3.13 Фотографія спектрогеліографа зі знятою обшивкою. Позначки: EW – вхідна діафрагма, M1 – планоїдне дзеркало, M2 – головне дзеркало телескопа, M3 та M4 – дзеркала коліматора, DG – дифракційна ґратка, M5 та M6 – камерні дзеркала, DM – діагональне дзеркало. [137]

3.3 Отримання субпіксельної роздільної здатності при реєстрації спектрів

Спектрометр являє собою складну систему взаємопов'язаних блоків і його параметри багато в чому залежать від ступеня узгодженості взаємодіючих пристроїв. Якщо, наприклад, роздільна здатність детектора істотно поступається цій же характеристиці камерного об'єктива спектрографа, то підсумкове розділення буде визначатися детектором. Роздільна здатність оптичної системи визначається її апаратною функцією, яка є відгуком системи на δ -подібний сигнал на вході. Для оптичного приладу таким сигналом є сигнал від точкового джерела. Розміри й форма зображення точкового джерела визначаються дифракційними явищами на апертурі приладу, аберацією оптики, роздільною здатністю детектора та

іншими факторами. Просторова роздільна здатність фотодетекторів визначається розмірами пікселя детектора. Аналогом пікселя для фотопластинок являється зерно фотоемульсії. Типові розміри зерна фотоемульсії та пікселів твердотілих приладів із зарядним зв'язком (ПЗЗ) приблизно одного порядку і складають величину близько 10 мкм. Тому перехід від фотографічних реєструючих середовищ до ПЗЗ не супроводжувався великим стрибком роздільної здатності. Той факт, що останні все більше витісняють з ужитку фотоматеріали в фотоапаратах і кінокамерах пояснюється високим квантовим виходом фотодіодів, експлуатаційними зручностями, оперативністю їх використання, сумісністю з комп'ютерами та іншими їх безумовними перевагами [152, 154, 155]. Чим більше світлосила оптики, тим менше розмір дифракційного зображення точки [25, 78]. Так при світлосилі оптичного інструменту, що дорівнює одиниці – цей розмір становить величину близьку до довжини світлової хвилі. Для видимого спектра це буде близько 1 мкм, а для ультрафіолету відповідно в кілька разів менше. Природним вирішенням проблеми є зменшення, хоча б на порядок, розмірів пікселя, але це пов'язано з великими технологічними труднощами. Тому необхідно шукати інші способи її розв'язання.

3.3.1 Розгляд задачі в спектральному викладі

Одним зі способів підвищення роздільної здатності детектора є застосування оптимальної фільтрації, що використовує відновлювальний фільтр з підйомом верхніх просторових частот. Застосування відновлювального фільтра дає тим більший ефект, чим більше відношення сигнал/шум в потрібній для нас смузі частот. Тому, ті ділянки спектру зареєстрованого сигналу, де передавальна функція детектора наближається до нуля, не можуть бути відновлені таким фільтром.

Для оцінки потенційних можливостей такого роду фільтрації розглянемо передавальну функцію одновимірного детектора з розміром пікселя рівним w . У цьому одновимірному випадку імпульсною

характеристикою детектора в координатній площині буде розподіл чутливості уздовж пікселя. Перетворення Фур'є імпульсної характеристики детектора є його функцією передачі в частотному поданні. Якщо чутливість всередині пікселя постійна, то імпульсна характеристика детектора на графіку може бути представлена прямокутним імпульсом з абсолютно крутими фронтами. Перетворення Фур'є від такого імпульсу являє собою функцію $\sin(\pi wk)/\pi wk$. На Рис. 3.14 в логарифмічному масштабі зображені модулі перетворення Фур'є прямокутного імпульсу з абсолютно крутими фронтами (1) і куполоподібного імпульсу з пологими фронтами (2) в залежності від відносної просторової частоти k .

Куполоподібний імпульс моделювався експоненційною функцією нормального розподілу з одиничною амплітудою і напівшириною близько $0.4w$. Напівширина визначається умовами нормування, щоб площа під куполоподібним і прямокутним імпульсами була однаковою. Порівняння цих кривих показує, що поведінка передавальної функції для цих двох випадків істотно різна.

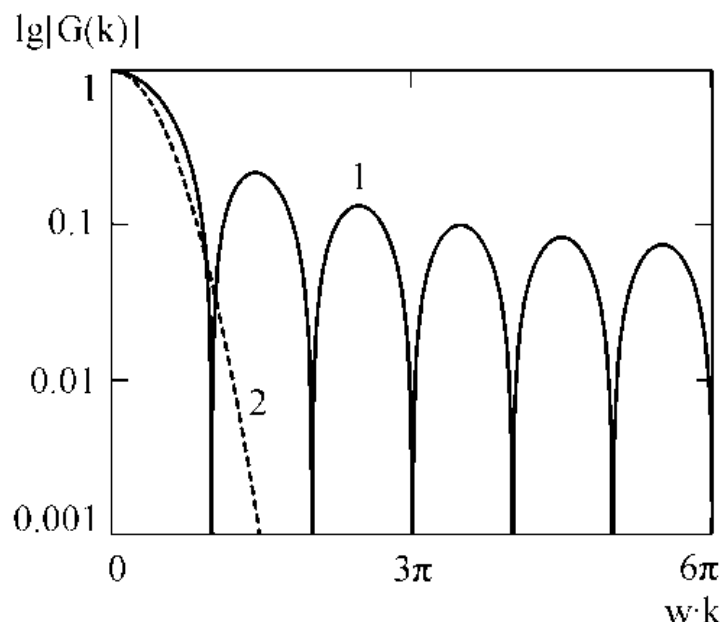


Рис. 3.14 Залежність логарифма модуля передавальної функції $G(k)$ детектора з прямокутним (1) і куполоподібним (2) розподілом чутливості всередині пікселя від wk [8]

Модуль передавальної характеристики детектора в області високих просторових частот в першому випадку на багато порядків більше, ніж у другому. Таке перевищення дає підставу очікувати, що в першому випадку при досить великому відношенні сигнал/шум відповідною обробкою вдасться отримати субпіксельне розділення. Великим недоліком залежності, представленої кривою 1 є наявність провалів на деяких просторових частотах. Це є невіддільною властивістю детектора з регулярною структурою, що складається з однотипних фотодіодних елементів. У деяких випадках фотопластинка, що має в середньому таке ж зерно, як і піксель твердотілого фотодетектора може давати більш інформативне зображення, ніж фотодіодна структура, що пов'язано з деяким різноманіттям розмірів зерен фотоемульсії і їх хаотичним розташуванням. Особливо наочно це проявляється при реєстрації одновимірних об'єктів, наприклад, спектрів [156]. На Рис. 3.15 кривої 1 представлений усереднений модуль передавальної функції детектора з різними розмірами пікселів ($0.6w$, w і $1.4w$) отриманий при моделюванні.

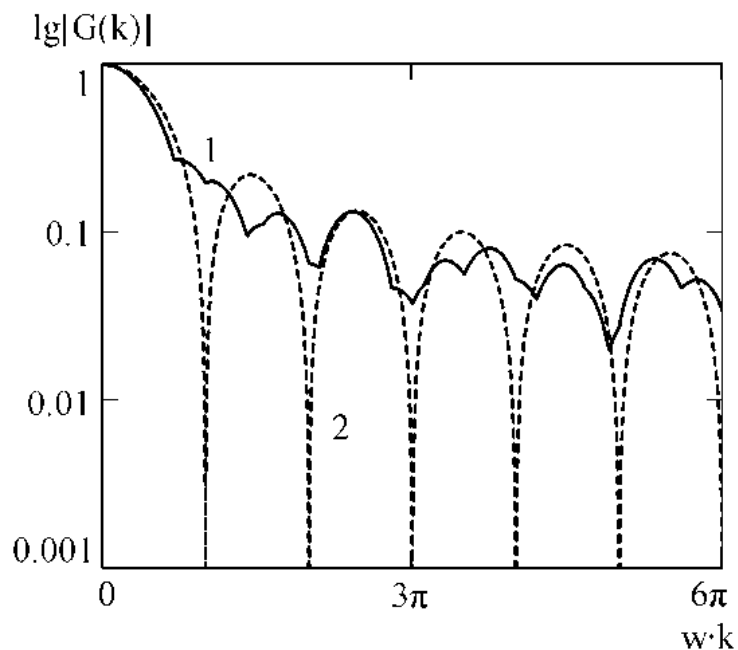


Рис. 3.15 Порівняльні характеристики частотної передавальної функції детектора з пікселями різного (1) і однакового (2) розміру. Позначення на осях як на малюнку 3.14 [8]

Він свідчить про значне послаблення коливань сумарної передавальної характеристики такого детектора в порівнянні з детектором, що має пікселі однакового розміру w (крива 2). Ще більш згладжену характеристику можна отримати, збільшивши різноманітність значень ширини пікселів. Реалізувати на практиці такий детектор можна було б, розділивши світловий потік і зареєструвавши одне і те ж зображення кількома детекторами з різними розмірами пікселів. Аналогічний ефект може бути отриманий з однотипними реєструючими камерами, але з оптичними трактами різного збільшення. Обидва ці варіанти пов'язані зі значним ускладненням апаратури. Значно простіше виглядає апаратна реалізація такого способу в послідовному варіанті. Він застосовується лише для стаціонарних в часі зображень.

Суть послідовного варіанта полягає в тому, що в процесі реєстрації зображення багатоканальним детектором проводиться зсув зображення фотометрованого сюжету щодо пікселів фотодетектора. Цей метод згадується в роботах [8, 157], де він застосовувався при фотометруванні зображень спектрів, тобто в одновимірному випадку.

В більшості випадків у світлосильному емісійному спектрометрі сигнал значно перевищує темновий струм детектора. У зв'язку з цим достатня точність фотометрування забезпечується порівняно короткими експозиціями, близько 0,1 секунди. Але, у зв'язку з повільними процесами розігріву і випаровування зразка, загальний час вимірювання необхідно значно збільшувати, іноді до декількох хвилин. Це призводить до того, що в більшості випадків спектральні вимірювання складаються з набору N однакових експозицій. Пропонується кожен з цих N експозицій отримувати після зсуву спектра на $1/N$ ширини пікселя. Це досить просто здійснити технічно, наприклад, поворотом плоскопаралельної пластини, розміщеної безпосередньо за щілиною спектрографа. При цьому на спектральній кривій ми отримаємо в N раз більше відліків, ніж зазвичай. Зсув спектру щодо лінійки в межах одного пікселя при послідовних експозиціях не тільки підвищує фотометричну точність при коректній обробці даних вимірювань,

але і відкриває можливість реалізації повної оптичної роздільної здатності спектрального приладу навіть з відносно широкими пікселями лінійки фотодіодів. Ця додаткова можливість в ряді випадків може бути навіть більш цінною, ніж фотометрична точність.

3.3.2 Розгляд задачі в координатному представленні

В роботі [157] не наводиться опису алгоритму вирішення цього завдання. При пошуку алгоритму були проаналізовані потенційні можливості використання спектрального та координатного представлення сигналу. У нашому випадку сигнал являє собою нерегулярну послідовність піків на тлі темного струму та інших шумів фотодетектора. Форма піків визначається розподілом яскравості всередині спектральної лінії. Зі збільшенням роздільної здатності оптичного блоку спектрометра форма піків наближається до δ – функції. У зв'язку з тим, що δ – подібний сигнал має широкий спектр, що спадає з підвищенням частоти, а шум в нашому випадку можна вважати білим, то співвідношення сигнал/шум у високочастотній області зменшується. Тому вигідніше це завдання вирішувати не в частотному, а в координатному представленні методами лінійної алгебри.

Для розв'язання цієї спектрометричної задачі був застосований алгоритм, суть якого зрозуміла з наступного спрощеного розгляду. Нехай послідовно реєструються два масиви даних, отриманих при зміщенні фотодіодної лінійки на половину ширини пікселя. Це випадок, коли $N = 2$. Завдання полягає в знаходженні масиву подвоєної довжини, відповідно до подвоєного розділення лінійки. Вона зводиться до вирішення системи лінійних рівнянь типу:

$$M \cdot X = B, \quad (3.4)$$

де: X – невідомий вектор, B – вектор результатів вимірювань,

$$M = \begin{pmatrix} 110 & \dots & 000 \\ 011 & \dots & 000 \\ \dots & \dots & \dots \\ 000 & \dots & 110 \\ 000 & \dots & 011 \end{pmatrix}.$$

У векторі B парні й непарні компоненти відносяться до двох експозицій, отриманих при зміщенні спектра на половину ширини пікселя. Якщо ширина лінії значно менше ширини пікселя, то існує потенційна можливість підвищення розділення не у два, а в більше число разів. В цьому випадку N повинно дорівнювати не двом, а більшому числу i , відповідно, збільшується кількість одиниць в рядках матриці M .

Слід зазначити, що система (3.4) є невизначеною навіть за відсутності шумів, тому, що кількість невідомих завжди на одиницю більша, ніж кількість рівнянь. Але ці складнощі можна подолати завдяки апріорним даним, які супроводжують спектральні вимірювання. Ця обставина дозволяє написати додаткові рівняння та отримати коректне рішення системи. В якості одного з варіантів апріорних даних можна використовувати значення спектральної кривої в проміжках між лініями. Зазвичай емісійний спектр має нерівномірний розподіл щільності спектральних ліній в залежності від довжини хвилі (Рис. 3.16). Це одна з реалізацій спектра лампи ТМН.

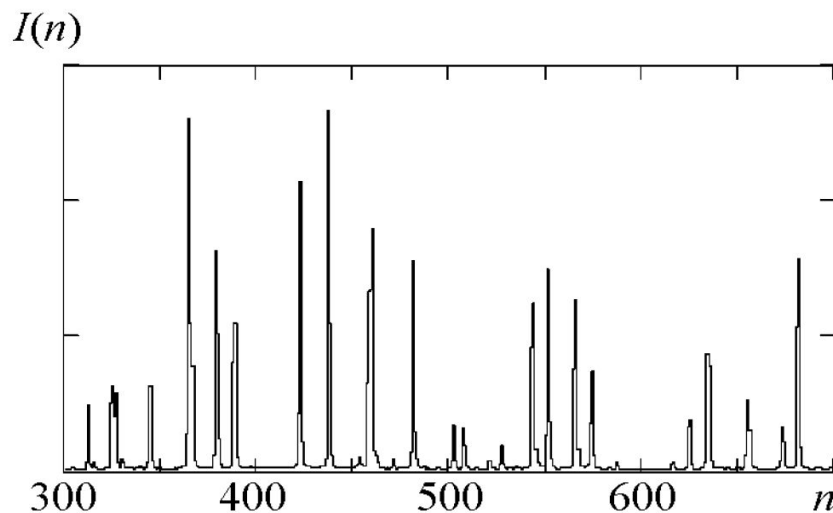


Рис. 3.16 Залежність величини світлового потоку атомно-емісійного спектра світіння газорозрядної лампи зареєстрованого фотодіодною лінійкою $I(n)$ від номера пікселя лінійки n [8]

У проміжках між спектральними лініями крива залежності інтенсивності світлового потоку від довжини хвилі для емісійного спектра

порівняно гладка. В цьому випадку весь спектр можна розбити на ділянки, початки й кінці яких лежать в областях між спектральними лініями. У цих областях інтерполяційна формула дає малі помилки для інтерпольованих значень. Ці значення можна використовувати в якості апіорних даних. У разі завдання значень функції на обох кінцях інтервалу вимірювань приходимо до перевизначеної системи рівнянь з матрицями вигляду:

$$M = \begin{pmatrix} 1000 & \dots & 0000 \\ 1100 & \dots & 0000 \\ 0110 & \dots & 0000 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0000 & \dots & 0110 \\ 0000 & \dots & 0011 \\ 0000 & \dots & 0001 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

При надмірній кількості рівнянь рішення доцільно шукати методом найменших квадратів [8, 158]. У цьому випадку завдання зводиться до вирішення системи:

$$M^T \cdot M \cdot X = M^T \cdot B, \quad (3.6)$$

де верхнім індексом T відзначено транспонування матриці M . Для випадку (3.5) матриця $M^T \cdot M$ має вигляд:

$$M^T \cdot M = \begin{pmatrix} 2100 & \dots & 0000 \\ 1210 & \dots & 0000 \\ 0121 & \dots & 0000 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0000 & \dots & 0012 \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Для великих ділянок спектра розмірність цієї матриці досягає декількох тисяч, але у зв'язку з тим, що вона має кодіагональний вид, система вирішується без великих труднощів. Легко перевірити, що чисельне значення визначника квадратної матриці (3.7) розміром $(m \cdot m)$ завжди дорівнює $(m + 1)$. Якщо ввести позначення:

$$b = M^T \cdot B,$$

то компонентами вектора b будуть суми двох сусідніх компонент вектора B :

$$b_i = B_i + B_{i+1}.$$

У цих позначеннях рішення системи (3.6) можна представити в такому вигляді:

$$X = \frac{1}{|M^T \cdot M|} \cdot K \cdot b, \quad (3.8)$$

де матриця коефіцієнтів K , які можна назвати ваговими, складається методом математичної індукції без всяких обчислювальних процедур. Наприклад, для системи рівнянь з чотирма невідомими

$$K = \begin{pmatrix} 4 & -3 & 2 & -1 \\ -3 & 6 & -4 & 2 \\ 2 & -4 & 6 & -3 \\ -1 & 2 & -3 & 4 \end{pmatrix}.$$

Для систем рівнянь з іншими m матриця K має іншу розмірність і інші значення елементів. Але, не дивлячись на відмінності, існують і такі загальні властивості:

- незалежно від розмірності, матриця K симетрична щодо діагоналі;
- величина елементів лінійно убиває по модулю зі збільшенням відстані від діагонального елемента;
- вздовж рядків і вздовж стовпців маємо знакозмінну послідовність.

Цих трьох загальних властивостей досить для формування матриці K будь-якої розмірності. Такий підхід дозволяє реалізувати швидкий алгоритм розв'язання цієї задачі.

Крім того, обчислювальні труднощі рішення системи (3.6) значно зменшуються при розбитті відновлюваного інтервалу спектру на сукупність ділянок, «зшитих» своїми кінцями. В ході обчислення значення компонентів вектора X з виразу (3.8) відбувається множення рядка матриці K на вектор b , отриманий з результатів вимірювань. Завдяки другій властивості матриці K , максимальний внесок у величину X_i вносять i -й та $(i \pm 1)$ -й елементи вектора результатів вимірювань. Вимірювання, віддалені від B_i слабо позначаються

на значенні X_i . З цієї ж причини ослаблений і вплив шумової компоненти вектора b .

3.3.3 Експериментальні результати

Описаний алгоритм дає прийнятну точність у випадку малих шумів і незмінності передавальної характеристики вимірювальної системи при двох послідовних експозиціях. В реальних умовах експерименту важко забезпечити стаціонарні умови, а шуми принципово дають неповторювані дані. Це іноді призводить до осцилюючих рішень для вектора X , подібне до того, яке описано в роботі [159]. Там же пропонуються різні прийоми згладжування для придушення подібних осциляцій.

Описаний алгоритм подвоєння чіткості зображення спектра був застосований на експериментальній установці, що складається зі спектрографа ИСП-51 і системи реєстрації на базі багатоеlementного сенсора ILX511 фірми SONY з шириною пікселя рівною 14 мкм. Спектрограф має відносний отвір 1 : 5.5, що дозволяє на дифракційній межі побудувати зображення світної точки діаметром 6.6 мкм для світлової хвилі довжиною 0.5 мкм. Це у два рази менше розміру пікселя багатоеlementного сенсора ILX511. Для зсуву зображення спектра щодо фотодетектора в проміжку між щілиною і коліматором спектрографа, в безпосередній близькості від вхідної щілини розміщувалася плоскопаралельна пластинка кварцу товщиною близько 2 мм. Ця пластинка в проміжках між експозиціями поверталася з кроком близько $4 \cdot 10^{-3}$ радіана. При такому повороті пластинки зображення спектра зміщуються на величину, приблизно рівну десятій частині ширини пікселя. Таким чином, ми отримували на спектрограмі на порядок більше відліків, ніж зазвичай. У процесі попередньої обробки зареєстрованого масиву здійснювалося згладжування і нормування виміряних даних. Зі згладженої спектрограми лінійною інтерполяцією були отримані усереднені значення з кроком рівним строго половині ширини пікселя.

На Рис. 3.17 представлений в збільшеному масштабі фрагмент спектра, зображеного на Рис. 3.16, На інтервалі між 357-мим і 398-мим пикселом.

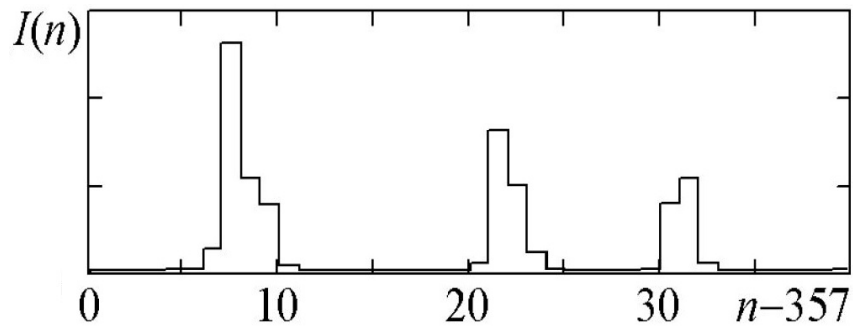


Рис. 3.17 Фрагмент спектру, зображеного на Рис. 3.16 до обробки. Позначення на осях як на малюнку 3.15. [8]

На Рис. 3.18 представлений той же фрагмент з подвоєнням розділення в результаті дії описаного алгоритму.

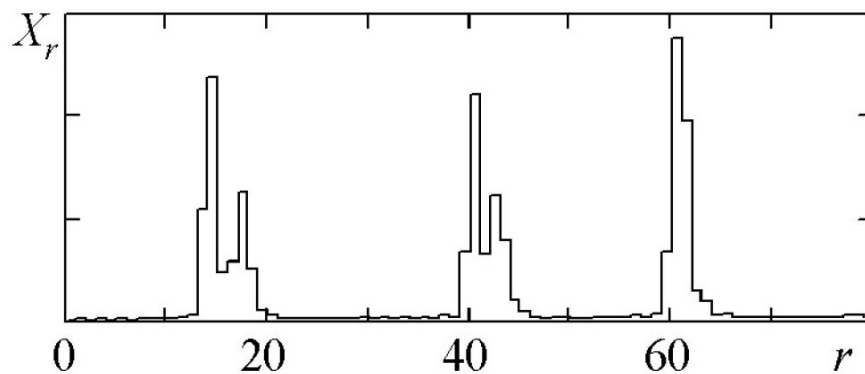


Рис. 3.18 Результат обробки даних вимірювань, представлених на Рис. 3.17. X_r – масив обчислених значень, r – порядковий номер члена масиву [8]

Порівняння вхідних та оброблених графічних даних, наведених на Рис. 3.17 і Рис. 3.18 переконливо свідчить про ефективність представленого підходу до проблеми субпіксельного розділення при спектральних дослідженнях. З них слідує, що нерозділені спектральні лінії розпалися на компоненти. Це дозволяє позбутися від заважаючого впливу сусідніх спектральних ліній і позбавитися шкідливого фазового ефекту при фотометруванні спектрів, який досліджувався в роботі [7].

Розглянутий алгоритм підвищення роздільної здатності послідовним застосуванням дозволяє, в принципі, збільшити роздільну здатність системи

реєстрації до повного оптичного розділення оптики спектрографа, при довільних розмірах пікселя фотоприймача. Якщо ж ширина спектральної лінії більше ширини пікселя, то цей метод не дозволяє отримати істотного виграшу в роздільній здатності. Межі застосування цього методу вирішальною мірою залежать від поведінки співвідношення сигнал/шум при збільшенні просторової частоти сигналу.

Висновки до розділу 3

1. Використання увігнутих дифракційних ґраток максимально спрощує апаратуру і мінімізує втрати на відбиття, особливо в короткохвильовій частині ультрафіолетового діапазону.

2. Встановлено, що при рівномірному кроці нанесення прямолінійних штрихів, роздільної здатності ґратки не достатньо для створення настільного спектрографа. Застосування дифракційної ґратки з криволінійними штрихами, нанесеними з нерівномірним кроком, дозволяє усунути цей недолік. Використання такої ґратки дозволяє значно зменшити аберації й скоротити розміри спектрометра. Результати розрахунків підтверджені комп'ютерним моделюванням і результатами натурних випробувань. На базі такої ґратки розроблений і виготовлений настільний прилад для аналізу металевих зразків.

3. В результаті розрахунку і макетування декількох оптичних схем зі схрещеною дисперсією, показані їх переваги та недоліки. Обґрунтовано доцільність використання схеми зі схрещеною дисперсією в поєднанні з матричними ПЗЗ і КМОН фотоприймачами. Запропоновано оригінальну дзеркальну оптичну схему спектрографа з компенсацією сферичної аберації камерного дзеркала спектрографа за рахунок гіперболізації коліматора.

4. На основі спроектованої оптичної схеми виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра,

що дозволяє одержувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

5. Вперше розроблено спосіб збільшення роздільної здатності багатoeлементних фотоприймачів при реєстрації спектрів, який складається з апаратної модернізації спектрометра, що дозволяє виконати мікрометричний зсув зображення спектра щодо пікселів детекторних лінійок, а також алгоритму обробки з урахуванням особливостей спектральних даних АЕСА. Це відкриває можливість отримання субпіксельного розділення спектральних зображень аж до повної оптичної роздільної здатності спектрального приладу. Експериментально отримана роздільна здатність 7 мкм, що у два рази менше ніж розмір пікселя фотоприймача 14 мкм.

Результати розділу відображені в роботах автора [7, 8, 10, 13, 14, 15, 22, 25].

РОЗДІЛ 4

БАГАТОКАНАЛЬНІ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ СПЕКТРІВ

У розділі наводиться короткий перелік лінійних сенсорів, що застосовуються в АЕСА, сформульовані основні вимоги до сенсорів. Наводяться конструктивні рішення багатосенсорних камер і опис мультисенсорної камери авторської розробки. Здійснені дослідження температурних і динамічних характеристик сенсорів TCD1304AP (Toshiba), а також їх порівняння з сенсорами, що мають антиблумінг. Проведені випробування розробленої камери при фотометруванні різних джерел світла.

Роботи з розробки, проектування та створення систем реєстрації спектрів ведуться автором більш ніж 20 років. За цей час було створено кілька поколінь камер для реєстрації спектрів на базі лінійних фотоприймачів: 1200ЦЛ7 (CPCP) [160, 161, 162] ILX526 (Sony) [163], ILX511 (Sony) [164], S5463–1024Q (Hamamatsu) [165], TCD1205 (Toshiba) [166], TCD1304 (Toshiba) [167], а також матричних фотоприймачів: TC-241 (Texas Instruments) [151] і LUPA-4000 (Cypress Semiconductor) [139,168]. Для керування камерами використовувалися мікроконтролери KP1830BE31 (CPCP)[169], AT90S8515 (Atmel) [170], рішення на базі процесорів Intel, а також програмовані логічні матриці серії MAX, Flex, Asex і Cyclone компанії Altera [171]. З поступом вдосконалення комп'ютерної техніки та розвитку стандартів інтерфейсів зв'язку з комп'ютерами було розроблено апаратне й програмне забезпечення для керування камерами та передачі даних для інтерфейсів RS232, ISA, PCI, Ethernet, USB. У процесі виконання робіт автором було розроблено кілька оригінальних схемних рішень в тому числі: схема завантаження конфігурації програмованої матриці FLEX10K по шині ISA, схема диференціальної корельованої вибірки для фотоприймача 1200ЦЛ7 [136], схема узгодження і зсуву рівнів для фотоприймача TCD1304 та інші.

4.1 Вимоги щодо камер для реєстрації спектрів

Основні вимоги до спектральних камер – це висока чутливість, широкий динамічний діапазон і роздільна здатність. Попри високу яскравість плазових утворень, оптичні спектральні прилади мають низьку ефективність використання світлового потоку, в першу чергу через обмеження входною щілиною. У зв'язку з тим, що джерело світла не являється когерентним і випромінює світлову енергію в тілесному куті 4π стерадіан, – в діафрагму малої площі, згідно з законом про фазовий об'єм для світлових потоків, можливо направить тільки обмежену частину загального потоку джерела світла [172]. До того ж спектри мають дуже велику нерівномірність енергій спектральних ліній, що накладає високі вимоги до чутливості й динамічного діапазону фотоприймача [11]. Основними параметрами, що визначають чутливість і динамічний діапазон фотоприймачів є квантова ефективність, темновий струм, шуми зчитування, місткість фоточутливого елемента, а також геометричні розміри й форма пікселя. Всі ці параметри залежать від технології та топології виготовлення фотоприймача, до того ж квантова ефективність залежить від довжини хвилі реєстрованого випромінювання, а темновий струм від температури фотоприймача і розмірів пікселя. Для підвищення чутливості в камерах для спектрального аналізу використовують фотоприймачі з дуже витягнутою прямокутною формою пікселя, що добре узгоджується з формою щілини спектрографа. Розміри пікселя для фотоприймачів варіюються від 25×2500 мкм для деяких фотоприймачів Hamamatsu [173] до 7×200 мкм (ILX526) Sony [174].

Роздільна здатність реєстратора залежить від співвідношення розмірів пікселя і півширини спектральної лінії. Чим менше це співвідношення, тим вище роздільна здатність реєстратора. Це обумовлено апаратною функцією оптичного блоку, шириною входної щілини, а також природною шириною спектральної лінії.

Основні параметри фотоприймачів, що застосовувалися автором для реєстрації спектрів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Основні параметри лінійних фотоприймачів, що застосовуються для спектрометрії

Тип фотоприймача	Кількість пікселів	Ширина пікселя (Мкм)	Висота пікселя (мкм)	Чутливість $V / (lx * s)$	Динамічний діапазон	Анти-блумінг
1200ЦЛ7 (CPCP)	1024	13	500	16	–	–
ILX526 (SONY)	3000	7	200	300	320	+
ILX511 (SONY)	2048	14	200	200	276	+
ILX554 (SONY)	2048	14	56	240	333	–
TCD1205 (Toshiba)	2048	14	200	80	400	+
TCD1304 (Toshiba)	3648	8	200	160	300	–
S5463–1024Q (Hamamatsu)	1024	25	500	5.3 / 53 *	2000/250 *	+

* Для режиму низької та високої чутливості

Одним з головних засобів збільшення рівня сигналу на виході фотоприймачів є збільшення часу накопичення. Для цього спектральні камери проєктують з діапазоном експозицій від 0.01 с і менше до одиниць і десятків секунд. У разі використання довгих витримок (більш 1–2 с) для зниження рівня темнового струму застосовують охолодження фотоприймачів за допомогою елементів Пельтьє або рідкого азоту [175, 176, 177, 178].

Важливою вимогою до камер для атомно-емісійного спектрального аналізу є широкий спектральний діапазон, особливо в ультрафіолетовій

області спектра, у багатьох випадках аж до вакуумного ультрафіолету. Якщо в спеціалізованих фотоприймачах Hamamatsu виробник гарантує працездатність сенсора в широкому спектральному діапазоні [173], то для забезпечення чутливості в УФ області сенсори компанії Toshiba вимагають заміни захисного скла на кварцове, а сенсори компанії Sony, крім того, ще й нанесення на світлочутливу область люмінофора для перетворення УФ випромінювання в видиму область спектра [179, 180]. Для підвищення оптичної ефективності в деяких спектрометрах компанії Ocean Optics використовують циліндричні лінзи перед фотоприймачем [181].

4.2 Способи узгодження фотоприймачів з оптикою спектрографів

Ще однією проблемою при проєктуванні спектральних камер є недостатні лінійні розміри сенсорів. Як правило, розміри фоточутливої області лінійних фотоприймачів, що серійно випускаються не перевищують 30мм, а загальна довжина спектра може бути на порядок більше. При цьому кожний сенсор має 1000–4000 фоточутливих пікселів, що визначається технологічними обмеженнями виробництва і корпусування. Застосування окремих фотодетекторних лінійок прийнятно тільки в разі спектрографів, що мають низьку роздільну здатність або вузький спектральний діапазон. Для типових спектральних приладів атомно-емісійного аналізу металів характерний спектральний діапазон 200–400 нм при роздільній здатності 0,1 Å, тобто загальна кількість пікселів для реєстрації необхідного спектрального діапазону з таким розділенням має становити ~ 20000. У разі необхідності аналізу таких елементів як C, S, P, спектральний діапазон розширюється в область вакуумного УФ до 170 нм, а в разі аналізу лужних металів у видиму й інфрачервону область аж до 800 нм. Так прилад Spectro Arcos компанії Spectro має спектральний діапазон 130–770 нм із загальною кількістю каналів реєстрації близько 120000 [182, 183]. Фокальна площа оптичних приладів з увігнутими дифракційними ґратками є циліндр (круг

Роуланда), що вимагає використання кусково-лінійної апроксимації та додаткових польових лінз для випрямлення зображення. У кварцових спектрометрах, з лінзовим камерним об'єктивом, представляє проблему сильний нахил фокальної площини (для спектрографа ИСП-30 понад 40°) [3, 85].

Для розв'язання проблеми узгодження фотоприймачів зі спектральною оптикою розроблено кілька методів. Одним з них є позиціонування камери в необхідну область спектра, це може бути реалізовано як вручну, з фіксацією камери в необхідній області по відліковому лімбу, так і автоматично, за допомогою крокового приводу. У деяких оптичних схемах позиціонування необхідної ділянки спектра на камері можливо за допомогою повороту дифракційної решітки в спектрометрі [3]. Приклад спектральної касети авторської розробки з ручним позиціонуванням камери представлений на Рис. 4.1.

Незважаючи на простоту, такий підхід має багато недоліків. Найголовніший з них – це неможливість реєстрації повного спектра, а також необхідність переналаштування і визначення положення спектра на сенсорі.



Рис. 4.1 Спектральна касета з ручним позиціонуванням камери

Наступним варіантом розв'язання проблеми розширення реєстрованого діапазону є створення мультисенсорних камер з кількома оптично узгодженими зі спектрометром фотоприймачами. В цьому випадку виникає задача мінімізації розривів при реєстрації спектра. Це пов'язано з тим, що тільки деякі спеціальні сенсори [184, 185] можуть бути стиковані з прийнятним проміжком між фоточутливими областями, а розміри корпусу серійних сенсорів перевищують розміри фоточутливої області приблизно в півтора раза [167] і стикування їх без проміжків неможливо. У деяких випадках можна розставити сенсори в області спектра з найбільш часто використовуваними аналітичними лініями, хоча це і призводить до обмеження потенційних можливостей апаратури. Для реєстрації повного спектра стандартними сенсорами розроблено кілька засобів оптичного розведення спектра на декілька сенсорів.

Установка сенсорів в шаховому порядку – при цьому варіанті сенсори розміщують у два ряди зі зміщенням близьким до розміру фоточутливої області сенсора, зазвичай з невеликим перекриттям $\sim 10\%$, тобто в зоні перекриття деякі ділянки спектра реєструються одночасно верхнім і нижнім рядом фотоприймачів (Рис. 4.2).

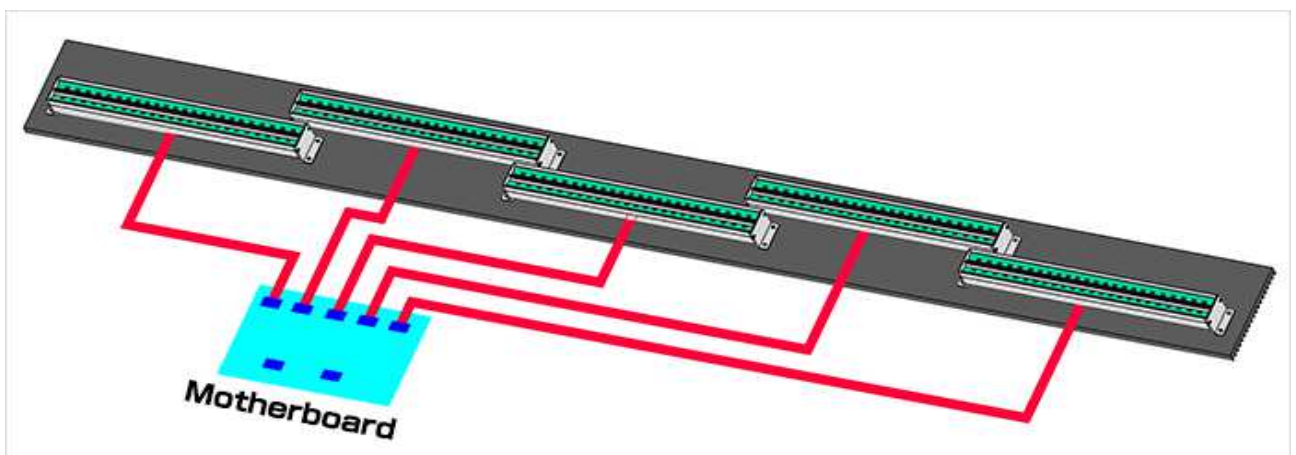


Рис. 4.2 Розташування лінійних сенсорів в шаховому порядку [186]

Основний недолік даного методу – спектр повинен мати висоту, що перевищує ширину корпусу фотоприймача, для стандартних ПЗЗ сенсорів цей розмір становить 10 мм. В цьому випадку можна використовувати тільки довгофокусні спектрографи, що забезпечують невикривлене зображення спектра такої висоти. До того ж необхідно забезпечити рівномірність освітлення і гарну юстировку вхідної щілини спектрографа для отримання порівнянних даних для обох рядів сенсорів. Наступним варіантом розв’язання даної проблеми є розміщення сенсорів з оптичним розведенням світла в прифокальній області за допомогою дзеркал. Можливі два варіанти такого розміщення:

1. Один рядок сенсорів освітлюється безпосередньо, а другий встановлюється під кутом 90° до основного ряду й освітлюється за допомогою 45° -х дзеркал, довжина яких дорівнює довжині фоточутливої області сенсора. Це схема з дзеркальними відбивачами через один (Рис. 4.3)

2. Обидва ряди фотоприймачів встановлюються під кутом $\pm 90^\circ$ до світлового потоку навпроти один одного і висвітлюються 45° градусними дзеркалами – шахова схема з дзеркальними відбивачами.

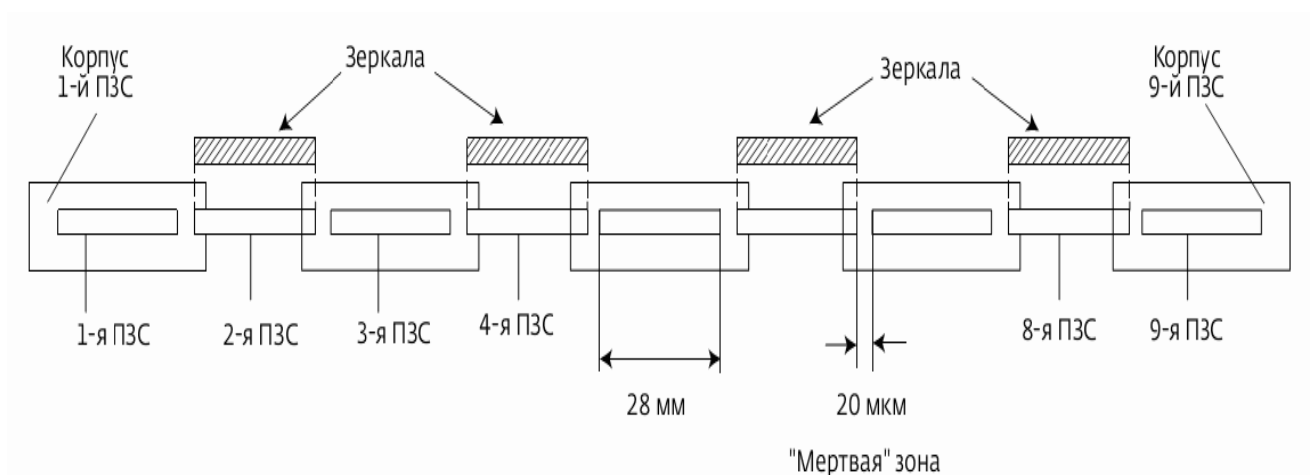


Рис. 4.3 Розташування сенсорів у фотоелектронній касеті з дзеркальними відбивачами через один [187]

До переваг першого варіанту слід віднести те, що половина фотоприймачів освітлюється безпосередньо і не мають втрат на додаткове

відбиття, що може бути важливо в короткохвильовій ділянці ультрафіолетового діапазону. Другою перевагою даного варіанту є те, що необхідна висота спектра в цьому випадку дорівнює висоті фоточутливої частини фотоприймача (тобто $\sim 0.2 - 2.5$ мм). До недоліків такого варіанту розміщення можна віднести те, що є нерівномірність освітленості фотоприймачів в зоні стикування (Рис. 4.4) і велика відстань від дзеркала до фоточутливої області, що визначається шириною корпусу фотоприймача. До того ж виникають суттєві труднощі юстування такої схеми особливо в спектрографах з косим падінням променів на фотоприймачі, таких як ИСП-28 і ИСП-30 [188].

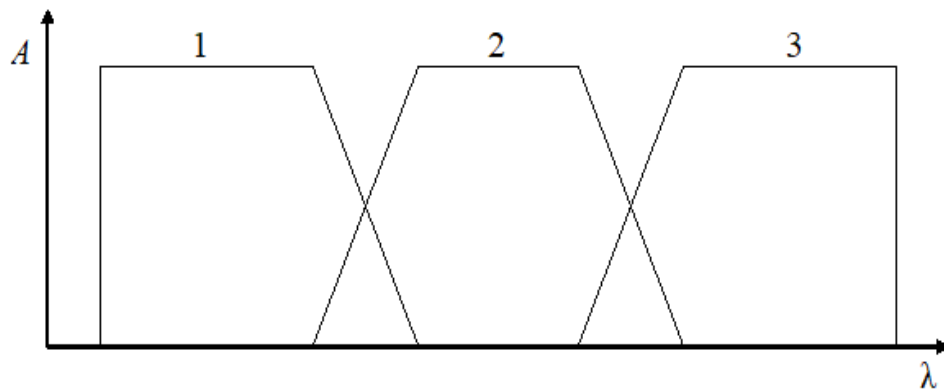


Рис. 4.4 Профіль інтенсивності падаючого випромінювання для установки фотоприймачів з дзеркальними відбивачами через один. Непарні сенсори (1 і 3) висвітлюються безпосередньо, парні (2) – через дзеркальний відбивач

До переваг другого варіанту розміщення слід віднести можливість розташування сенсорів зі значним перекриттям без втрат світла на краях сенсора і зменшена, в порівнянні з першим варіантом, відстань від дзеркала до фоточутливої області. Крім того, в цьому випадку, транспортування зарядів в зсувних регістрах ПЗЗ відбувається в протилежних напрямках, для верхнього і нижнього рядів сенсорів. Це дозволяє, при установці сенсорів зі значним перекриттям, на ділянках спектра, що реєструються одночасно верхнім і нижнім рядком реалізувати розширений динамічний діапазон реєстрації спектра за допомогою алгоритму обробки, описаному в розділі 4.5

[11]. До недоліків такого способу установки відносяться додаткові втрати на відбиття на дзеркалах, і вимога до збільшеної, у порівнянні з попереднім варіантом, невикривленої висоти спектра $\sim 2 - 4$ мм. Ще одним варіантом узгодження мультисенсорної камери з оптикою спектрометра є використання додаткових збираючих оптичних елементів, що зменшують масштаб зображення, перед кожним фотоприймачем (рис 4.5).

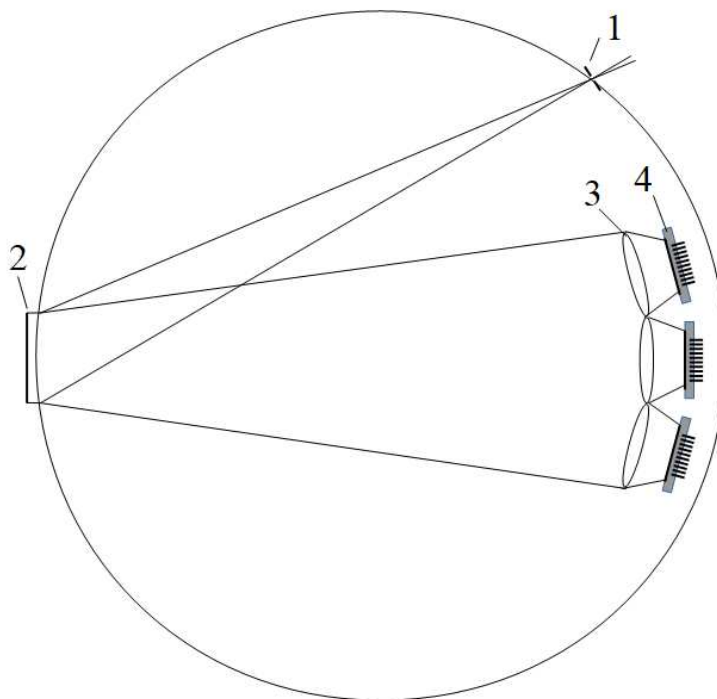


Рис. 4.5 Узгодження декількох фотоприймачів за допомогою додаткових фокусуючих оптичних елементів. 1 – вхідна щілина, 2 – дифракційна ґратка, 3 – передфокальні фокусуючі лінзи, 4 – фотоприймачі

До недоліків даного методу можна віднести втрати та викривлення на додаткових оптичних елементах і збільшені габарити оптики спектрометра.

Слід також згадати оптичну схему, розроблену і запатентовану компанією «Лесо» [189]. У ній застосована дифракційна ґратка з симетричним профілем штриха і нормальним падінням світла від коліматора, що формує два однакових дифрагованих промені в першому і мінус першому порядку спектра. Кожен з променів направляється на свій власний камерний об'єктив, в результаті від однієї щілини виходить два однакових спектри, що дозволяє розмістити сенсори в 1-му і мінус 1-му порядку зі значним

перекриттям. До недоліків такої схеми слід віднести втрати світла, що складають 50 % в порівнянні з дифракційною ґраткою з асиметричним штрихом, і подвоєння камерної оптики.

4.3 Мультисенсорний реєстратор спектра для АЕСА

Структурна схема однієї з останніх розроблених автором мультисенсорних камер представлена на Рис. 4.6, а зовнішній вигляд на Рис. 4.7 [26]

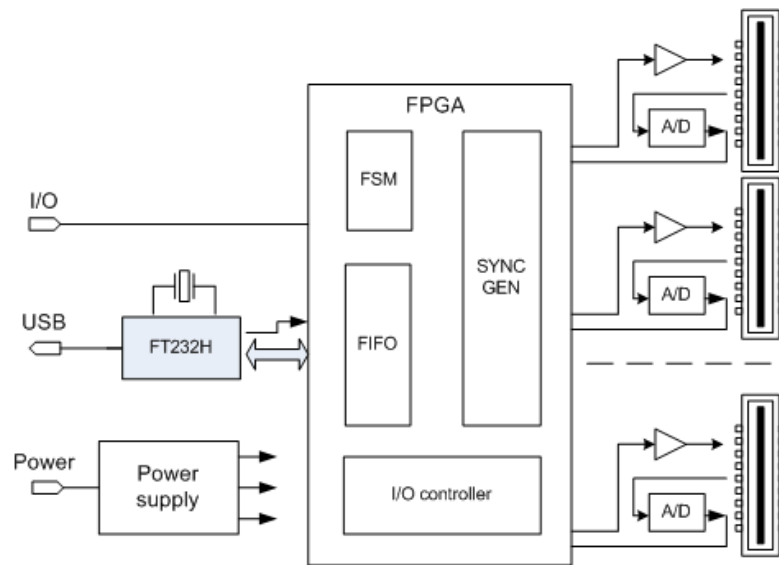


Рис. 4.6 Структурна схема мультисенсорної камери [26]



Рис. 4.7 Зовнішній вигляд мультисенсорної камери з шаховою установкою сенсорів і дзеркальними відбивачами [26]

Камера складається з плати керування та двох мультисенсорних плат розташованих одна над іншою зі зсувом на величину фоточутливої зони одного фотоприймача.

До складу плати керування входить контролер інтерфейсу USB, для зв'язку із зовнішнім комп'ютером, виконаний на базі мікросхеми FT323H компанії FTDI Chips [190]. Він забезпечує перетворення інтерфейсу USB 2.0 High Speed (480 Mbps) у двонаправлений восьмирозрядний паралельний синхронний інтерфейс. Тактова частота 60 МГц, яка формується контролером є опорною для синхронізації всіх інших блоків камери. Мікросхема FT232H реалізує логічні та фізичні протоколи інтерфейсу USB 2.0 High Speed і має програмні драйвера для кількох операційних систем [190].

Основні вузли синхронізації, керування, приймання, перетворення і передачі даних виконані на програмованій логічній матриці (ПЛМ) EP3C10E144 сімейства Cyclone3 компанії Intel (Altera) [191].

На базі програмованої логічної матриці реалізовані такі блоки як:

1. Генератор опорних частот, що виробляє з базової частоти 60 МГц основні опорні частоти для синхронізації всіх блоків камери.
2. Блок сполучення з контролером USB, що забезпечує приймання і передачу даних по восьмирозрядному синхронному інтерфейсу мікросхеми FT232H.
3. Керуючий логічний автомат (FSM – finite-state machine) забезпечує приймання, інтерпретацію і виконання команд, що приходять з базового комп'ютера через контролер USB інтерфейсу.
4. Пристрій для формування тактових сигналів ПЗЗ фотоприймачів і АЦП.
5. Вузла формування інтервалів експозиції і імпульсів запуску джерела збудження спектру.
6. Блоків перетворення даних АЦП, – перетворюють послідовні дані, що передаються з АЦП в паралельний багатобайтовий формат.

7. Буферне ОЗУ з архітектурою FIFO (First Input – First Output) обсягом 16 Кб, що служить для буферизації даних USB контролера.

Внутрішня структура ПЛМ розроблялася в схемотехнічному редакторі й мовою програмування VHDL в середовищі Quartus компанії Altera [191].

До того ж на платі розташовані:

- Інтерфейс генератора, що забезпечує зв'язок з генератором дуги / іскри для програмування режимів джерела збудження спектру.
- Блок живлення, що складається з декількох DC-DC перетворювачів, які забезпечують перетворення первинної напруги живлення +5 В в набір напруг необхідних для живлення всіх схем камери.

Фотографія плати керування представлена на Рис. 4.8.



Рис. 4.8 Плата керування мультисенсорної камери

До плати можна під'єднати дві мультисенсорні плати по 5 фотоприймачів на кожній (загалом 10 сенсорів) або до 15 плат з поодинокими сенсорами через додатковий концентратор.

На мультисенсорній платі знаходяться від 1 до 5 лінійних ПЗЗ сенсорів, буферні формувачі сигналів, АЦП (по одному для кожного сенсора), схеми посилення і узгодження рівнів. На платі встановлюються елементи кріплення 45°-х дзеркальних відбивачів. Дві плати згвинчуються в пакет, утворюючи єдиний блок який має від 2 до 10 лінійних сенсорів з відбивачами в шаховому порядку який встановлюється в спектральну камеру. Фотографія мультисенсорної плати з 4–ма встановленими фотоприймачами представлена на Рис. 4.9. Розробка всіх принципіальних схем і топології друкованих плат здійснювалась автором.

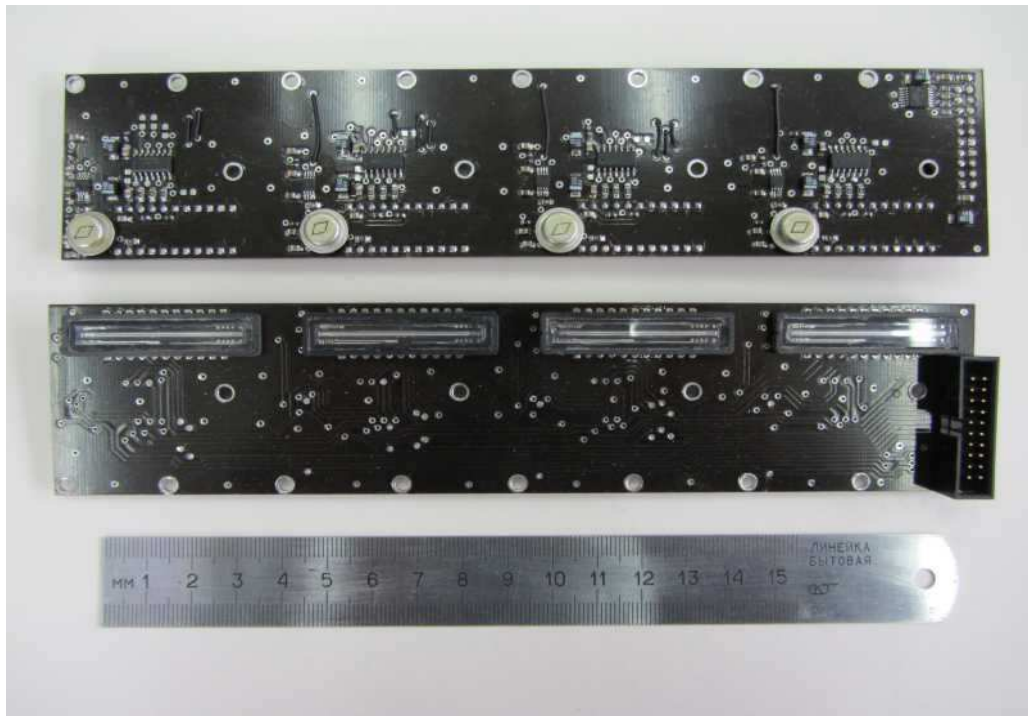


Рис. 4.9 Мультисенсорні плати з 4–ма фотоприймачами

4.4 Дослідження темного струму детектора

Поряд з безліччю позитивних якостей твердотілих ПЗЗ детекторів, у багатьох випадках вони мають недостатній динамічний діапазон для вирішення завдань атомно-емісійного аналізу при спектрометрії плазмових утворень. Відомо, що розігріта речовина в газоподібному стані випромінює

лінійчатий спектр. При цьому інтенсивність світла, випромінюваного збудженим атомом при електронному переході з рівня m на основний рівень, виражається формулою [192]:

$$I(T) = B \cdot \exp\left(-\frac{E_m}{R \cdot T}\right), \quad (4.1)$$

де B – константа, E_m – енергія збудженого рівня; R – універсальна газова постійна; T – абсолютна температура речовини. Згідно (4.1), вплив температури плазми на інтенсивність ліній спектрів є особливо сильним, тому що температура входить в показник експоненціальної функції. Плазмові джерела, які використовуються в атомно-емісійній спектроскопії, як правило, є неоднорідними в просторі та нестаціонарними в часі, що висуває специфічні вимоги до динамічного діапазону детектора випромінювання.

В роботі [192] наведені результати визначення динамічного діапазону ПЗЗ детектора для випадку рівномірного рівня засвічення всіх пікселів потужним джерелом. Обговорюються питання визначення положення спектральних ліній і розшифровки кратних ліній в разі роботи детектора на лінійній ділянці передавальної характеристики. У разі роботи на нелінійній ділянці профіль лінії, в основному, визначається перевантажувальними характеристиками детектора і мало залежить від його аналітичного представлення – у вигляді функції Гауса, Лоренца або Фойгта. Подібний підхід до дослідження динамічного діапазону використовується і в роботі [194] для аналізу світлодіодів.

Завдання апаратури спектрального аналізу полягає у вимірюванні розподілу спектральної потужності світлового сигналу $f(\lambda)$ як функції довжини хвилі λ . У фокальній площині спектрографа ця функція відтворюється як залежність $f(x)$ від координати x , спрямованої уздовж дисперсії приладу. За допомогою багатоеlementного фотоелектричного детектора лінійної структури вона перетворюється в послідовність відліків електричного сигналу f_n , які є результатами інтегрування функції $f(x)$ по

площі пікселя з порядковим номером n за час експозиції τ . Кожен n -й відлік є результатом інтегрування сигналу:

$$f_n = \theta_n(T, \tau) + Q_n(\tau) \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x) dx, \quad (4.2)$$

де, T – температура кристала, $\theta_n(T, \tau)$ – величина темнового струму, а $Q_n(\tau)$ – чутливість n - го пікселя фотодетекторної лінійки.

В ідеальному випадку постійну складову темнового струму можна виключити відніманням результатів експонування сигналу з закритим оптичним входом спектрометра. При цьому другий доданок в (4.2) обнуляється і, якщо всі виміри здійснюються при одній температурі, то постійну складову $\theta_n(T, \tau)$ в більшості випадків можна виміряти та виключити. Якщо ж термостатування відсутнє, то для виключення температурних впливів необхідно знати залежність $\theta_n(T, \tau)$. Величина τ завжди відома, тому що вона задається оператором або обчислюється керуючим процесором за відомим алгоритмом, а вимірювання температури кожного кристала мікросхеми пов'язане з ускладненням схеми установки. Щоб уникнути цих ускладнень було проведено дослідження можливості визначення температури за кількома параметрами вимірюваного сигналу, з тим, щоб розв'язати проблему на програмному рівні.

Флуктуації темнового струму детектора, шуми зчитування та аналого-цифрового перетворення обмежують динамічний діапазон знизу, при мінімальних сигналах. При великих сигналах основну роль грають нелінійні викривлення і неоднаковість чутливості пікселів детекторної лінійки – параметр Q_n в виразі (4.2).

В рамках вивчення властивостей напівпровідникових фотоприймачів, що використовуються в камерах реєстрації спектрів, було експериментально досліджено вплив температури на величину темнового струму на прикладі одного з найбільш вживаних в практиці спектроскопії фотоприймача TCD1304AP компанії Toshiba [16, 24].

Проблеми, пов'язані з темновим струмом, були розглянуті у загальній постановці (4.2). Відомо, що темновий струм ПЗЗ-детектора змінюється у 2 рази на кожні 8 градусів зміни температури кристала $\theta_n(T)$ [96]. Темновий струм, як одна зі складових результату поодинокого вимірювання, пропорційно забирає на себе частину динамічного діапазону вимірювальної системи. При високих температурах і великих експозиціях внесок цього доданка може привести до «зашкалювання» детектора. Тому при роботі в реальних умовах заводської лабораторії та цеху бажано охолоджувати детектори, або хоча б контролювати їх температуру.

Вимірювання температури кристала кожної мікросхеми пов'язане з ускладненням схеми та проблемами конструктивного характеру. Щоб уникнути ускладнень схем, було проведено дослідження можливості визначення температури кристала за параметрами вимірюваного сигналу, для розв'язання проблеми на програмному рівні. Дослідження проводилося з використанням описаної нижче установки.

В експериментальній установці використана мультисенсорна камера авторської розробки, описана вище, обладнана додатковими засобами контролю температури фотоприймачів, що складаються з:

- напівпровідникових термоелектричних охолоджувачів (елементи Пельтьє) ТЕМО-6;
- датчиків температури LM50 компанії National Semiconductor;
- аналогової схеми контролю температури;
- водяної системи охолодження, що включає радіатор, вентилятори, циркуляційний насос, трубопроводи та розширювальний бачок;
- камера поміщена в герметичний корпус з вікном з кварцового скла обладнаний поглиначами вологи на базі силікагелю Рис. 4.10.

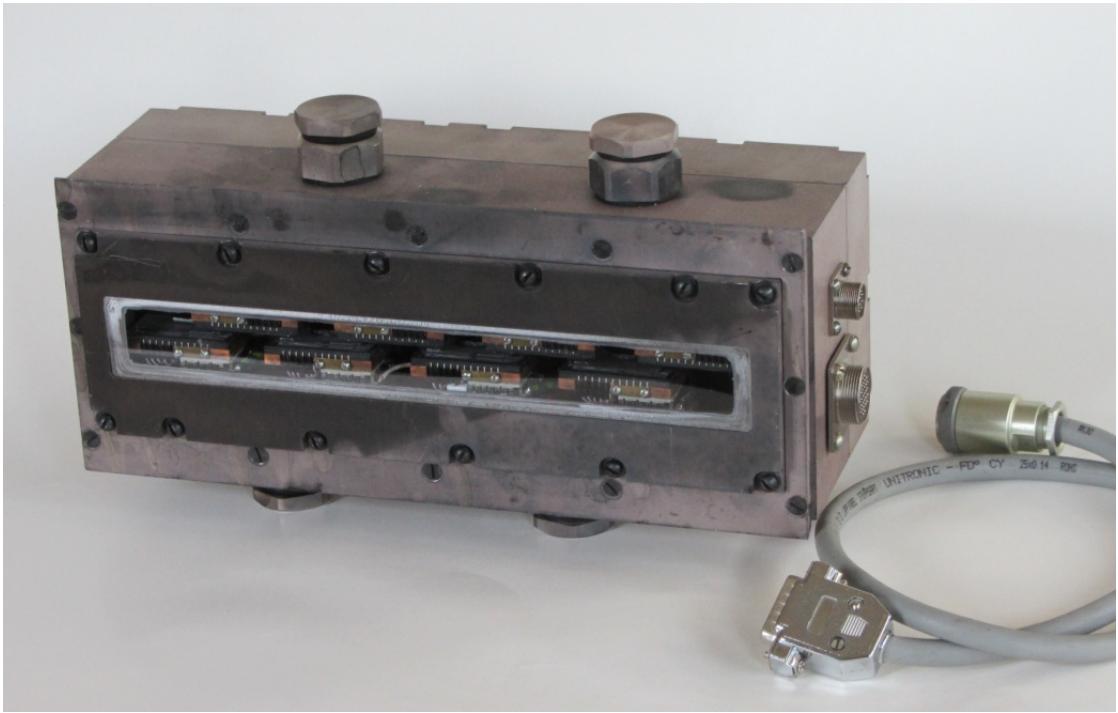


Рис. 4.10 Спектральна камера з термоелектричними охолоджувачами

На кожен сенсор було встановлено по одному термоелектричному охолоджувачу, тепло від яких відводилося через контур водяного охолодження.

Схема контролю температури дозволяє встановлювати температуру фотоприймачів в діапазоні від -25° до $+60^{\circ}$ С з точністю $\pm 0,5^{\circ}$ С.

В якості вимірювального стенда був використаний спектрограф ДФС-452, зі спектральними лампами та промисловим генератором ИВС-28.

Метою досліджень було вимірювання залежності шумів і динамічного діапазону ПЗЗ сенсорів в реальних умовах і визначення допустимого діапазону температур і експозицій при виробленні практичних рекомендацій для роботи в умовах лабораторії та цеху.

Динамічний діапазон реєстратора визначається відношенням максимального сигналу, що реєструється в межах робочої ділянки світлосигнальної характеристики до мінімально досяжних шумів. Шуми на виході реєструючої системи можуть бути обумовлені як фізичною природою процесу, так і технічними недоліками апаратури. Коли мова йде про

реєстрацію електромагнітного сигналу, то згідно з загальними фізичними законами корпускулярно-хвильового дуалізму мінімальна шумова компонента обумовлена квантовими флуктуаціями електромагнітного потоку, що реєструється. Не зважаючи на будь-які удосконалення апаратури фотонний шум світлового потоку, який пропорційний кореню квадратному з кількості фотонів, зареєстрованих за час експозиції, не може бути зменшений. Ця проблема часто виникає в астрономічних задачах при реєстрації гранично слабких об'єктів. Вона розглядається автором в роботі [25], яка присвячена прямим спостереженням екзопланет земної групи у віддалених зоряних системах.

Основними компонентами шуму, що пов'язані з технічною недосконалістю апаратури, є такі: флуктуації темного струму фотодіодів, шуми зчитування і шуми квантування аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Фотонним шумом світлового потоку, який пропорційний кореню квадратному з кількості фотонів, зареєстрованих за час експозиції, в нашому випадку можна знехтувати. Перші два компоненти шуму визначаються, в основному, паспортними характеристиками фотодетекторних лінійок, а шуми АЦП визначаються його розрядністю. При 12-разрядному АЦП, що використовувався в описуваному варіанті апаратури, шуми квантування менш ніж 0,1%. Це на порядок менше вкладу двох інших компонент, що дозволяє багаторазовим зчитуванням сигналу розширювати динамічний діапазон приладу. При цьому співвідношення сигнал / шум зростає пропорційно кореню квадратному з кількості зчитувань [192].

Якщо всі компоненти вимірювальної апаратури надійно закріплені, знаходяться в термостатованому приміщенні й не піддаються випадковим механічним впливам, то завжди є можливість врахувати температурну характеристику кожного пікселя прямим вираховуванням темного струму з результатів вимірювань. Для цього необхідно заздалегідь цю залежність зареєструвати, що не представляє великих труднощів. Але зазвичай в реальних заводських умовах температура непередбачувано змінюється в

широких межах, що може позначитися на кінцевих результатах аналізів. Для компенсації цього явища важливо знати температуру кристала фотодетекторної лінійки безпосередньо під час проведення аналізів. Інтегральні характеристики нерівномірності величини темнових струмів лінійок демонстрували досить високу стабільність, яка дозволяє надійно визначати температуру кристала фотодетектора опосередковано, без використання додаткових датчиків, що вельми корисно для реалізації в реальній апаратурі. Були проведені дослідження можливості проведення температурних вимірювань на основі даних, отриманих під час експерименту. Як вже зазначалося раніше, такий підхід розв'язує проблему на програмному рівні й не вимагає втручання в електротехнічну частину установки.

Аналіз темнового струму проводився в діапазоні температур від -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$ при експозиціях від 0.035 до 16 секунд. В ході експериментів спостерігалася значна нерівномірність шумових характеристик окремих пікселів лінійок один щодо одного.

Співвідношення рівнів темнових струмів між сусідніми пікселями, в окремих випадках, зростало в декілька разів, що демонструє Рис. 4.11.

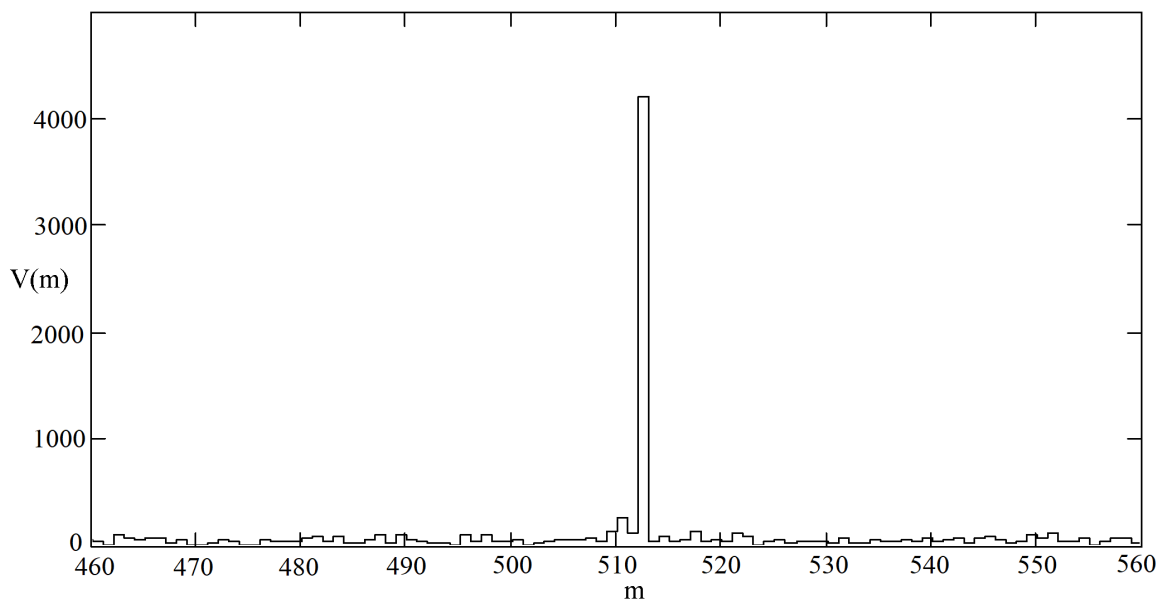


Рис. 4.11 Залежність темнового струму в розрядній сітці АЦП від № пікселя [24]

На цьому рисунку для однієї з лінійок представлена залежність темнового струму, вираженого в відносних одиницях, від номера пікселя.

Для визначення температури перевірений її зв'язок з наступними параметрами сигналу:

а) усереднені за багатьма відліками різниці між оцифрованим сигналом лінійки без засвічення й апаратним нулем, що вимірюється холостими циклами відразу після закінчення надходження сигналу зі зсувного ПЗЗ регістра лінійки Рис. 4.12.

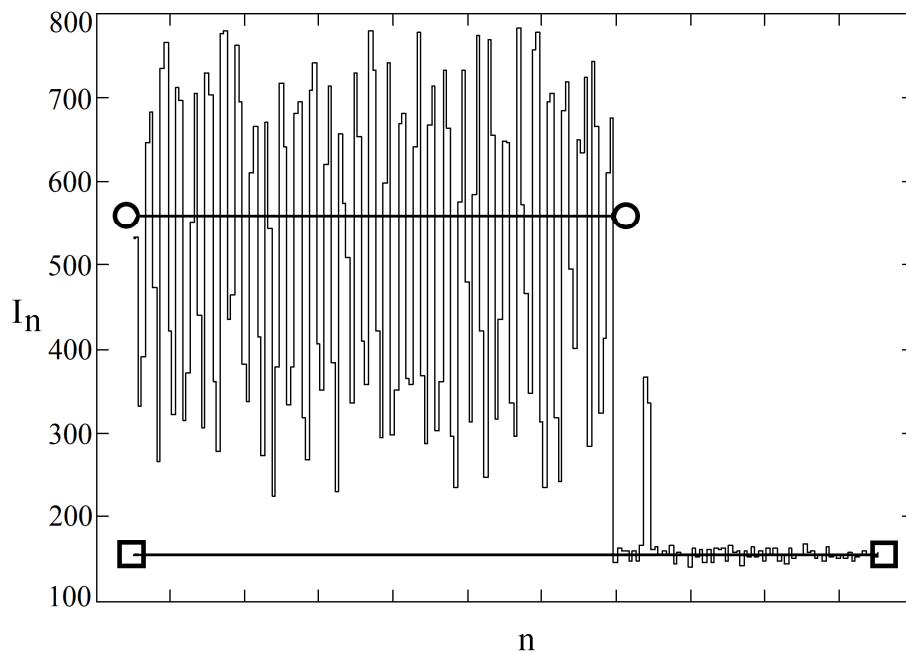


Рис. 4.12 Порівняння з апаратним нулем. Рівень апаратного нуля відзначений лінією $\square-\square$, а рівень сигналу без засвічення лінією $\circ-\circ$ [24]

б) Амплітуди періодичної структури, виявленої в сигналі сенсора Рис. 4.13. яка обумовлюється неідентичністю двох зсувних аналогових регістрів ПЗЗ і схем детектування зарядових пакетів.

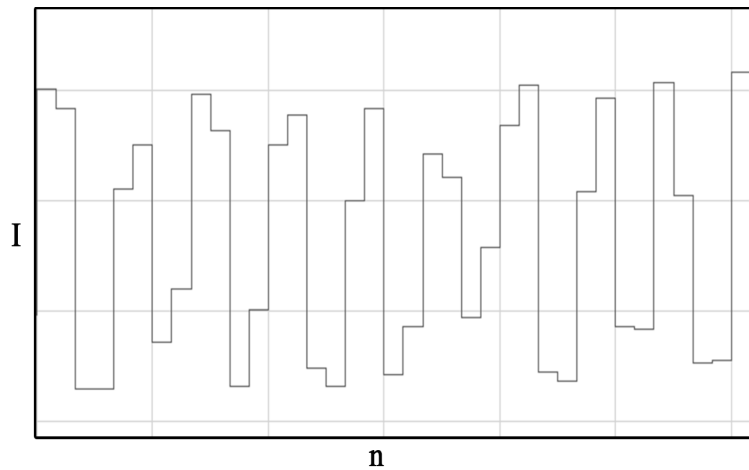


Рис. 4.13 Періодична структура темного струму [24]

в) Шумів, отриманих при відніманні двох сигналів (для виключення періодичної структури згаданої вище і постійної складової темного струму) Рис. 4.14.

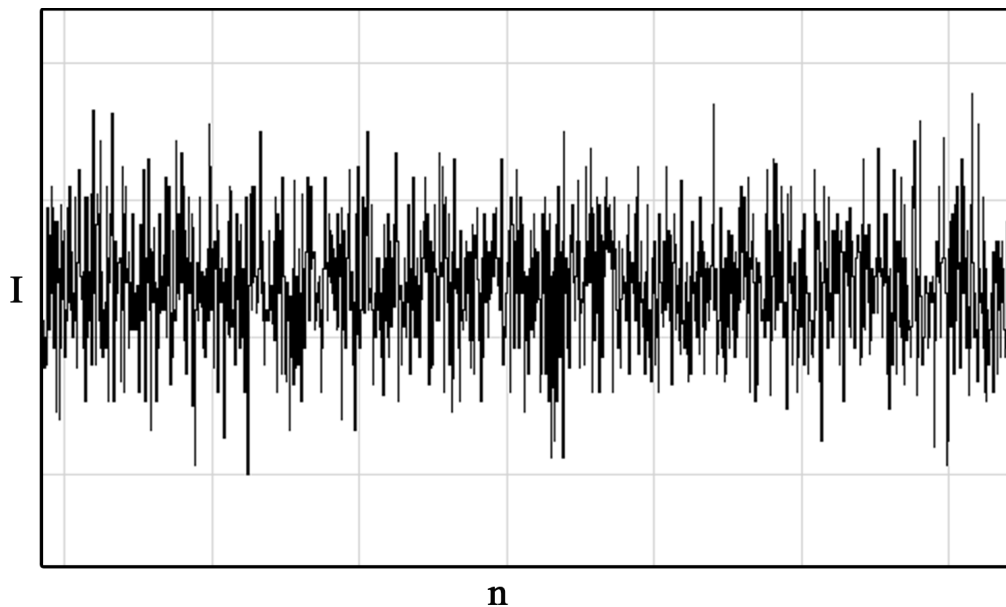


Рис. 4.14 Флуктуації змінної складової темного струму [24]

Були проведені по 16 вимірювань темного сигналу при $-20, -10, 0, 10, 20, 30^{\circ}\text{C}$ при різних експозиціях (від 0.035 до 16 с).

Деякі з отриманих залежностей зображені на малюнках 4.15 – 4.17.

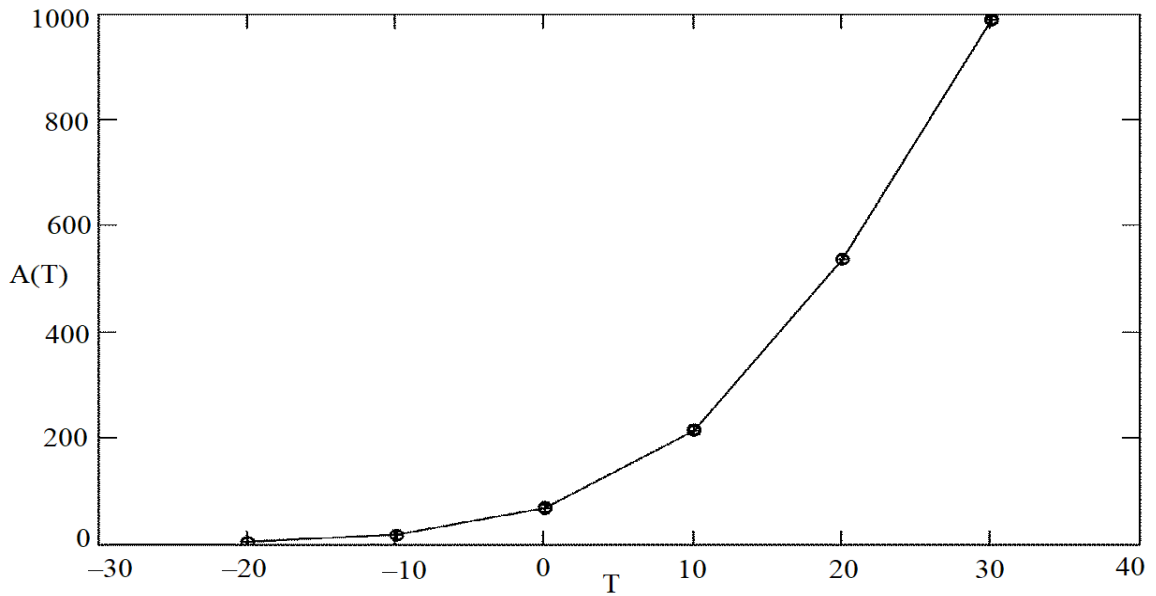


Рис. 4.15 Залежність перевищення темнового струму над апаратним нулем від температури. Експозиція 0,5 с [24]

Середньоквадратична помилка при використанні перевищення темнового струму над апаратним нулем вимірювання температури в діапазоні від $-20 \dots +30^{\circ}\text{C}$ не дотягувала до 0.2°C .

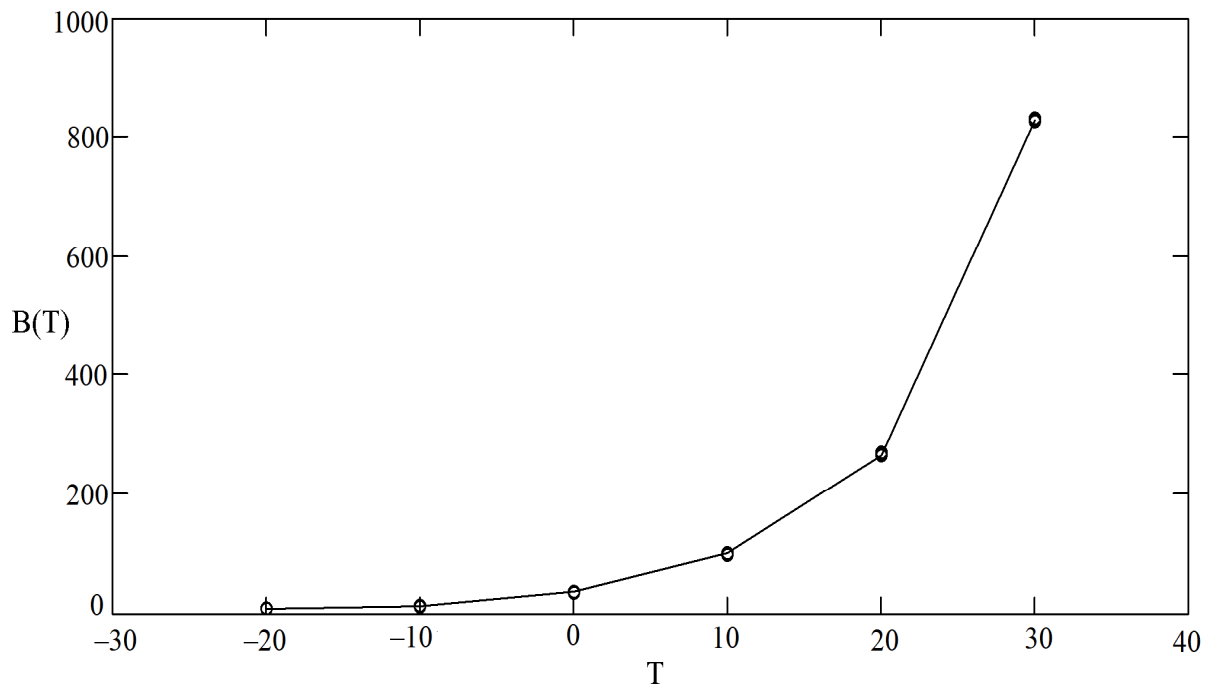


Рис. 4.16 Залежність амплітуди періодичної структури темнового струму від температури. Експозиція 0,5 с [24]

У разі вимірювання амплітуди періодичної структури темного струму при малих експозиціях середньоквадратична помилка вимірювання температури доходить до 1°C в інтервалі $-20 \dots 0^{\circ}\text{C}$ і кілька десятих градуса при позитивних температурах (Рис. 4.16).

У разі використання змінної складової темного струму при негативних температурах і малих експозиціях помилка може доходити до 5°C (Рис. 4.17).

Помилка вимірювання температури визначалася по відхиленню від середнього значення відповідного параметра з урахуванням тангенса кута нахилу графіка.

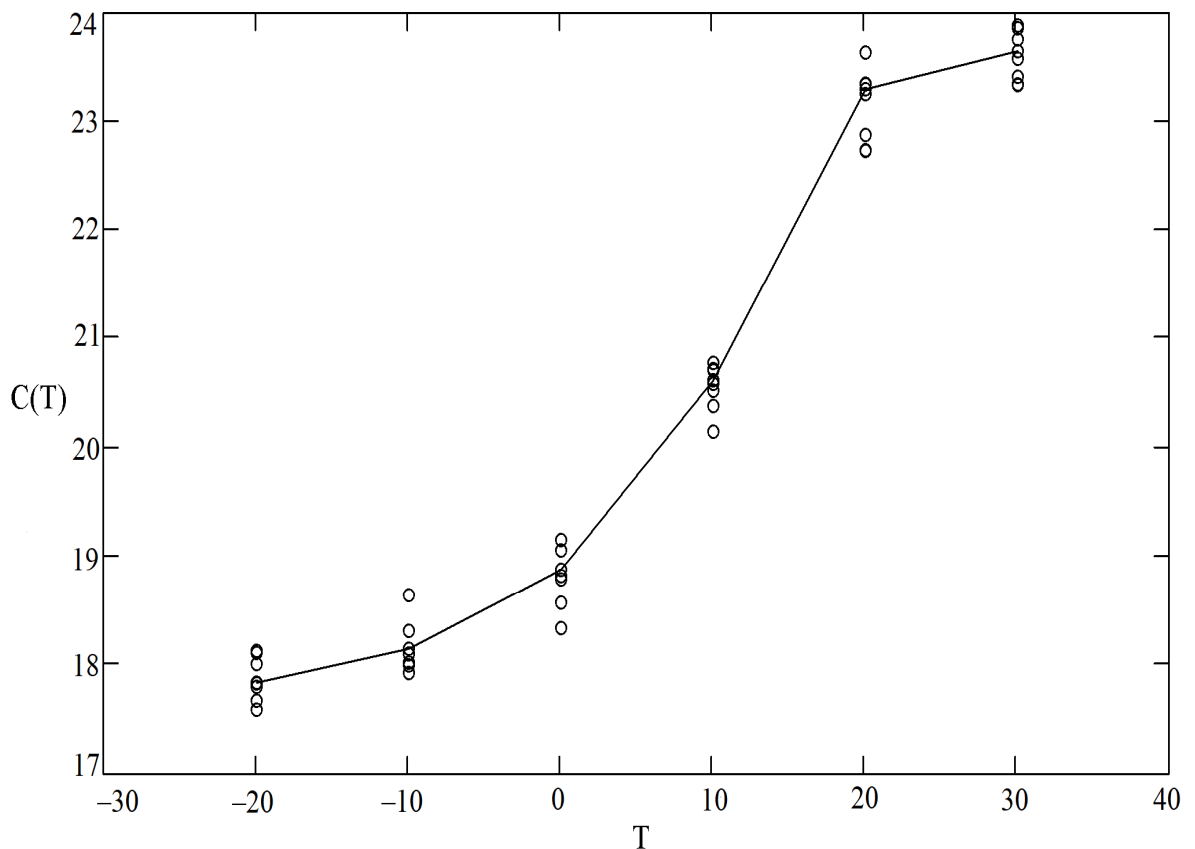


Рис. 4.17 Залежність шумової складової темного струму від температури. Експозиція 0,5 с [24]

Слід зазначити, що представлені дослідження є справедливими тільки для сенсора TCD1304AP, але подібні методи можуть бути застосовані для визначення температури багатоканальних фотоприймачів інших типів.

4.5. Дослідження нелінійності світлосигнальної передавальної функції сенсора

Для вивчення поведінки передавальної функції сенсора TCD1304AP від величини витримки будувалася залежність профілів спектральних ліній різних яскравостей з відніманням темнового струму [11]. На малюнку 4.18 зображені результати фотометрування окремої спектральної лінії, які отримані при восьми витримках від 0.1 с до 4-х с.

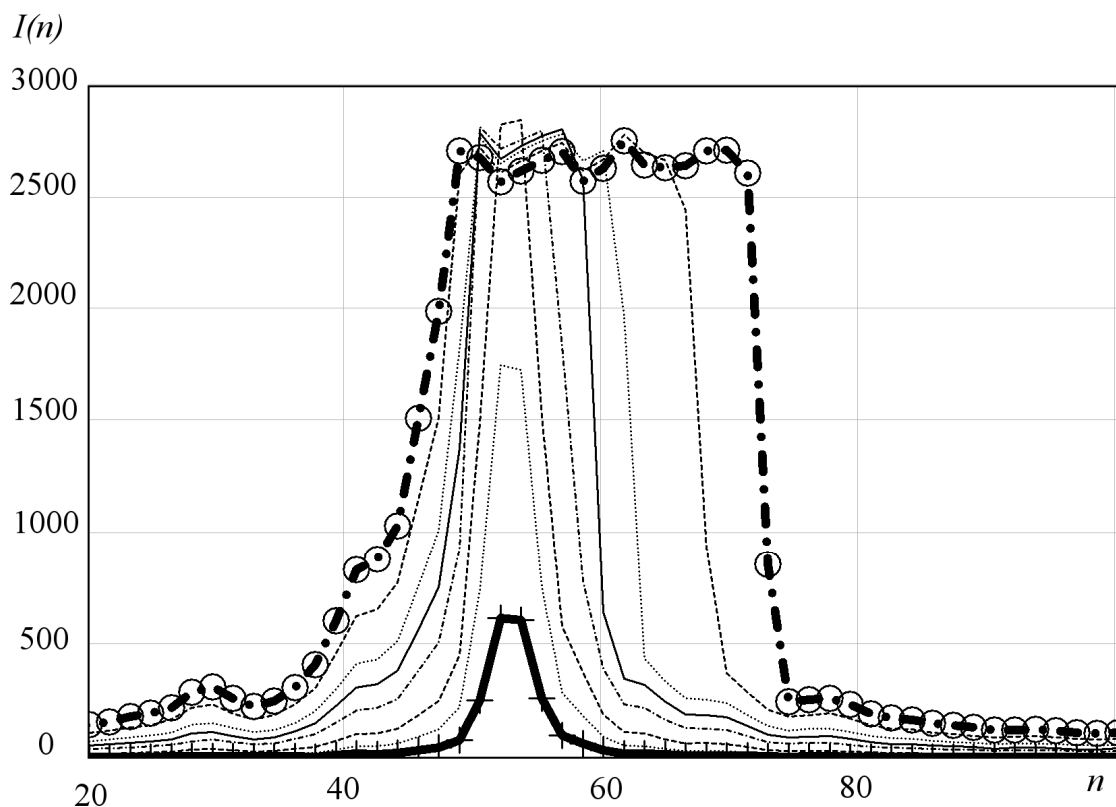


Рис. 4.18 Результати фотометрування спектральної лінії ртуті $I(n)$ з витримками 0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 с. Хрестиками позначено результат при мінімальній витримці (0.1 с), кружками – з максимальною (4 с).

З цього малюнка випливає, що з прийнятним ступенем викривлення зареєстровані спектри тільки з трьома найменшими витримками. В інших випадках сигнал обтяжений помітними на око нелінійними викривленнями – він обмежений зверху і має сильно затягнутий задній фронт. Це пов'язано зі специфікою накопичення і зчитування зарядів в приладах з зарядним зв'язком. Елементи накопичення, перенесення і транспортування заряду ПЗЗ переповнюються, і тому відбувається його втрата і розповзання на сусідні елементи (blooming effect). Специфіка накопичення і зчитування заряду детектора призводить також до помітної хвилястості в насиченні при максимальних значеннях сигналу. Зазначені недоліки виключають можливість розділення близько розташованих і ускладнюють обробку поодиноких ліній. Якщо в якості аналітичного параметра використовувати амплітудне значення спектральної лінії, то, в наведеному на Рис. 4.18 випадку, для вимірювань годяться тільки перші три експозиції. Для боротьби з блумінгом можна використовувати апаратні й програмні засоби. До апаратних засобів боротьби з розтіканням зарядів відноситься використання ПЗЗ з антиблумінгом, або фотоприймачів виготовлених за іншими технологіями не схильних до ефекту блумінга, – ПЗІ або КМОН [195, 196]. Також до апаратних засобів можна віднести спроби зменшення шумів зчитування за рахунок зміни форми та тривалості імпульсів керування ПЗЗ і застосуванням схем багаторазової передискретизації й фільтрації вихідних сигналів ПЗЗ, але максимальний виграш, досягнутий при цьому, становить всього лише 10% [197].

Серед програмних засобів слід зазначити оптимальний вибір витримки в залежності від яскравості та форми аналізованої спектральної лінії, а також правильний вибір аналітичного параметра. Розглянемо використання в якості аналітичного параметру не амплітуди спектральної лінії, а площі під її кривою розподілу. Поведінка цього параметра від тривалості експозиції залежить від дотримання закону взаємозамінності яскравості й витримки. Цей закон відомий в фотохімії, як закон Бунзена-Роско, а в фотографічній

фотометрії, як закон Шварцшильда [198]. У розглянутому нами випадку, при його дотриманні відношення площі під кривою розподілу яскравості в лінії до тривалості експозиції не повинно залежати від величини витримки. При лінійній світлосигнальній характеристиці значення такого відношення для всіх витримок повинні бути однаковими.

Якщо побудувати графік залежності цих значень від величини витримки, то в разі дотримання закону взаємозамінності маємо вийти на горизонтальну пряму лінію, як це представлено в роботі [194]. Насправді лінія ніколи не буває ні прямою, ні горизонтальною. Якщо отримані таким чином дані пронормувати для кожної спектральної лінії по їх максимальній величині, то отримаємо залежність площі від витримки $S(\tau)$, зображену на Рис. 4.19. На цьому малюнку представлені результати фотометрування трьох спектральних ліній, інтенсивності яких співвідносяться, приблизно, як 11: 115: 560.

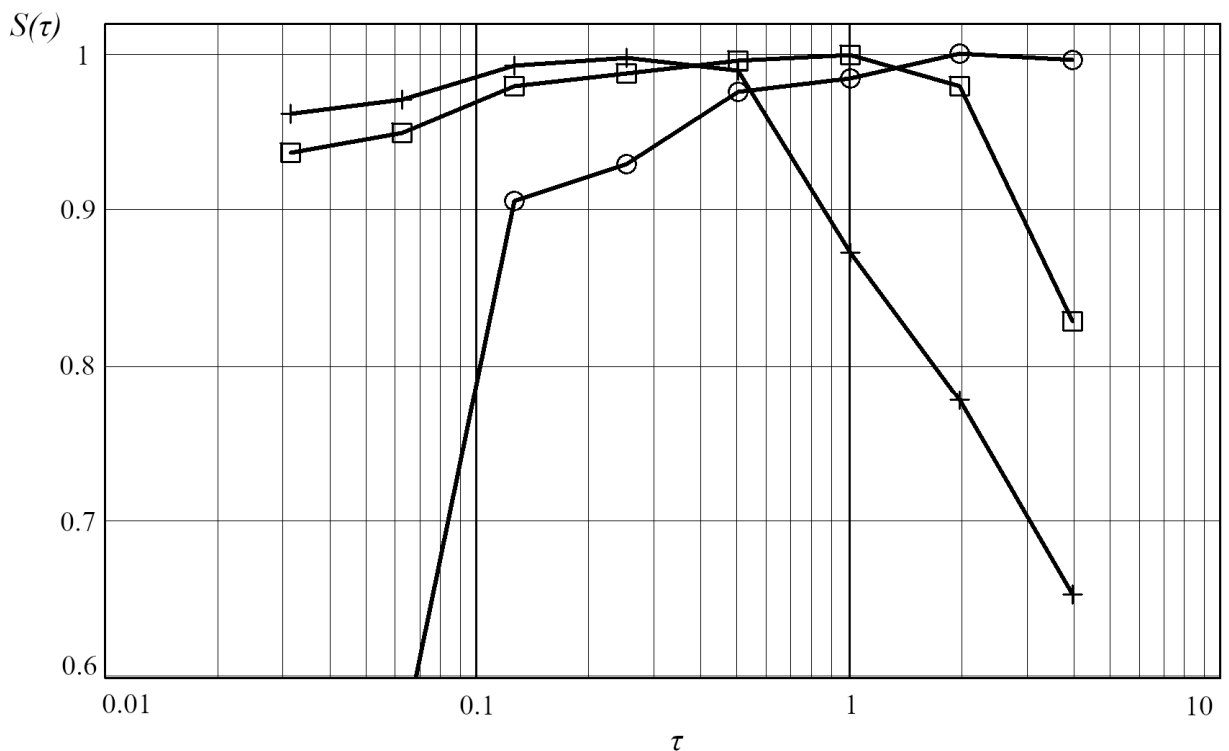


Рис. 4.19 Результати обчислення площ під кривими розподілу яркостей $S(\tau)$, в залежності від витримки в секундах. Позначення: спектральна лінія з амплітудою 11 умовних одиниць – $\circ \circ \circ$, 115 умовних одиниць – $\square \square \square$, 560 умовних одиниць – $+++$.

З малюнка випливає, що отриманий таким чином закон взаємозамінності може порушуватися і при мінімальних і при максимальних витримках.

Не можна не погодитися з [194], що з фізичних міркувань при слабких сигналах цей закон порушуватися не повинен. Але, тим не менш, за певних обставин він порушується і в згаданій роботі, і в отриманих результатах. Це пов'язано з тим, що при зменшенні витримки величина накопиченого сигналу прагне до нуля і може стати сумірною з шумами. В такому випадку, при відніманні темнового струму, в різниці можна отримати знакозмінну величину. Результат усереднення цієї різниці зі зменшенням витримки буде прямувати до нуля, що ми й спостерігаємо експериментально. Природно, що чим слабкіше лінія, тим сильніше виявляється цей ефект (Рис. 4.19). В аналітичній практиці завжди прагнуть уникати великих відмінностей в яскравості між досліджуваними лініями та лініями порівняння, коли цим ефектом можна знехтувати. Крім того, вплив згаданих факторів можна послабити більш коректною обробкою із застосуванням, наприклад, методу найменших квадратів. Для цього необхідно ввести додаткові параметри, які виключають появу негативних значень інтенсивності. Спектральні лінії малої інтенсивності зазнають тільки амплітудні викривлення, при цьому, на відміну від сильних ліній, їх форма не змінюється. При великих сигналах, як випливає з Рис. 4.19, профіль спектральної лінії спотворюється настільки, що апроксимувати його аналітично стає складним. Тому було запропоновано включити ці особливості апаратної функції в певний узагальнений параметр, який визначається експериментально у вигляді таблиці.

4.6 Дослідження впливу антиблумінгу на динамічний діапазон сенсорів

З метою вивчення питань дотримання закону взаємозамінності, були досліджені також кілька ПЗЗ лінійок, представлених в табл. 4.1, які мають вбудовані засоби боротьби з блумінгом (TCD1205, ILX511) [9]. У сенсорах цього типу відсутнє розтікання зарядів на сусідні пікселі, і, здавалося б, можна сподіватися на значне розширення динамічного діапазону. Для оцінки ступеня обґрунтованості таких надій були виконані порівняльні дослідження закону взаємозамінності яскравості лінії і тривалості експозиції для лінійок різних типів. Для цього результати фотометрування спектральних ліній різної амплітуди ділилися на величину тривалості експозиції. При дотриманні закону взаємозамінності отримані відношення не повинні залежати від тривалості експозиції, тобто вони повинні лягати на пряму, паралельну осі експозицій. Всякі відхилення від цієї прямої свідчать про наявність нелінійностей світлосигнальної функції сенсора. Рис. 4.20 ілюструє поведінку функції взаємозамінності для двох спектральних ліній, зареєстрованих сенсорами трьох типів.

Ці лінії відрізняються за амплітудою, приблизно, в десять разів. Суцільними лініями зображені дані лінійки TCD1304 компанії Toshiba (без антиблумінга). Пунктирними й точковими лініями відображені результати, отримані лінійками з антиблумінгом ILX511 (Sony) і TCD1205 (Toshiba), відповідно.

По осі τ відкладена витримка в мілісекундах. З цих даних випливає, що серед протестованих сенсорів трьох типів закон взаємозамінності найкраще дотримується при використанні лінійки без антиблумінга TCD1304. Застосування ПЗЗ детекторів, з вбудованими апаратними засобами придушення ефекту блумінга, а також ПЗІ, або КМОН сенсорів, не схильних до цього ефекту, як випливає з наведених вище даних, не завжди допомагає.

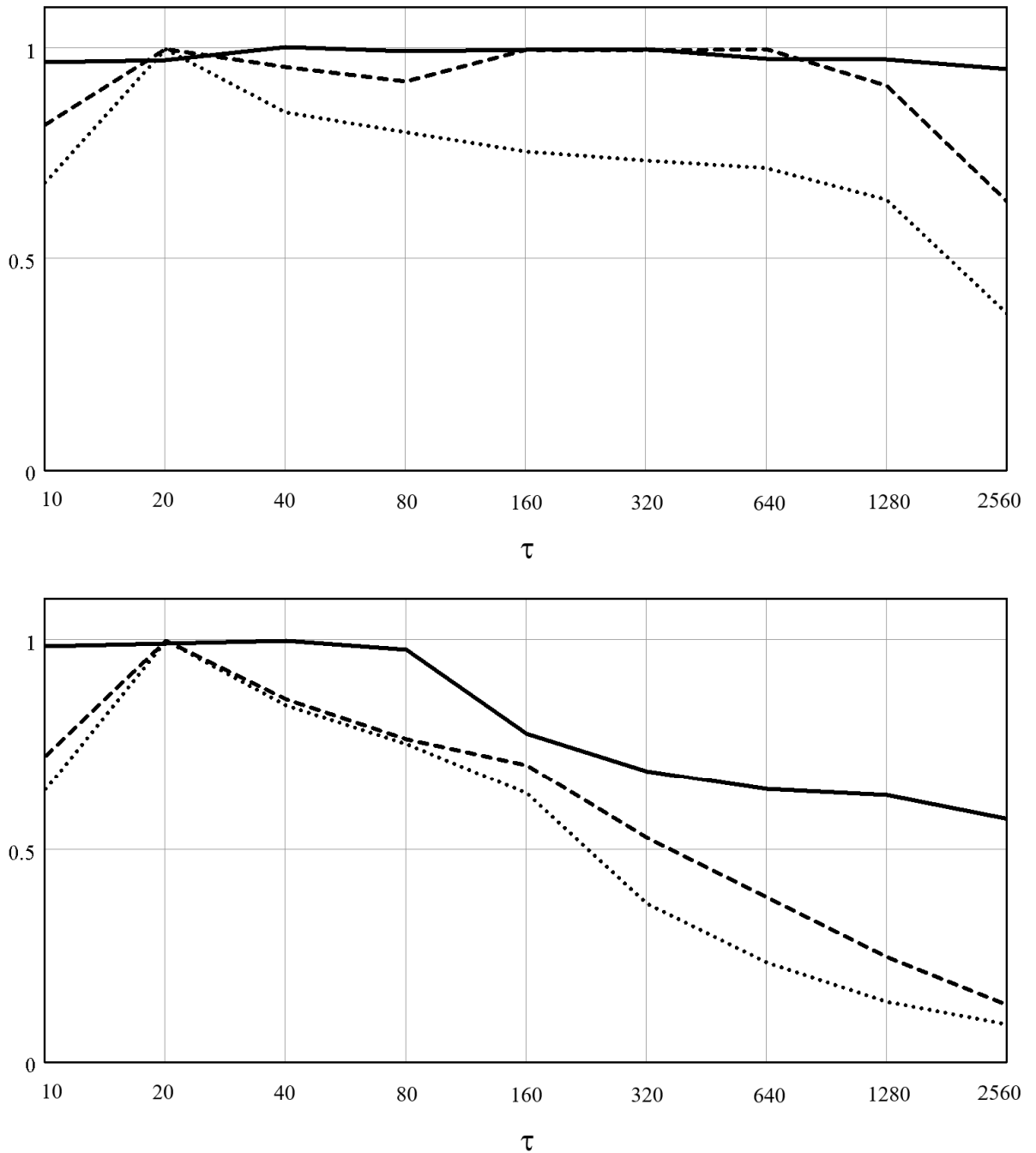


Рис. 4.20 Графіки дотримання закону взаємозамінності в залежності від тривалості експозиції τ для ліній малої (вгорі) і великої (внизу) амплітуди (— TCD1304, --- ILX511, ... TCD1205)

По-перше, схеми антиблумінга займають до 30% корисної площі детектора і, отже, погіршують fill factor фотоприймача [195, 196]. По-друге, частина електронів, що генеруються світлом, безповоротно губляться і не можуть бути використані для фотометрування. В цьому відношенні сенсори без антиблумінга поведуться принципово по-іншому. Вони не зливають

надлишкові заряди повз системи реєстрації, а передають їх уздовж транспортного регістра через вимірювальні елементи в систему обробки. Таким чином, надлишкові заряди не втрачаються, а розподіляються вздовж зсувного регістру і, при більш оптимальній обробці, можуть, в принципі, сприяти підвищенню фотометричної точності. Як показує Рис. 4.20 суцільна лінія зберігає горизонтальний стан в більшому діапазоні, ніж пунктирні й штрихові. Тільки при великих експозиціях вона починає «провалюватися», тому що частина зарядів все одно втрачається, але втрати менше, ніж у сенсорів з антиблумінгом. Наявність антиблумінга в детекторі завжди передбачає його нелінійну светосигнальну характеристику за рахунок зливу заряду, що перевищує певне значення. Тому природно, всякого роду втрати, в тому числі й накопиченого заряду, негативно позначаються на точності.

4.7 Випробування реєструючої камери з різними джерелами світла

В процесі проведення порівняльних випробувань генератора ЦУГ-2 (розд. 2.3.) [11] були виконані випробування реєструючої камери. Для цього, крім генераторів, як джерела світла використовувалася вакуумна лампа з порожнистим катодом типу ТМН, а також світлодіод з довжиною хвилі 405 нм. За результатами випробувань виявилось, що СКВ фотометричних даних для стенду з лампою ТМН дорівнює 0.01185, а для світлодіода – 0.00186. Порівнюючи ці дані з даними табл. 2.3, при формальному підході, можна зробити висновок, що СКВ лампи ТМН в 3.5, а світлодіода у 22 рази менше, ніж генератора ЦУГ-2. Це було б строго за умови нескінченно малої ціни найменшого відліку (ЦНВ) вимірювальної системи, яка визначається розрядністю АЦП системи реєстрації [199]. При недостатній розрядності крок квантування перевищує експериментальне відхилення і це не дозволяє підвищувати точність результату збільшенням кількості вимірювань. Зі зменшенням експериментального відхилення, підвищуються вимоги до розрядної сітки АЦП. Тому для визначення допустимого співвідношення

відхилення результатів експерименту використовувався світлодіод, як найбільш стабільний з наявних джерел світла. Для нього була побудована гістограма з інтервалами квантування в точності рівними міжразрядному інтервалу дванадцятирозрядного АЦП. Для цього спочатку було проведене сортування отриманих даних в цій розрядній сітці. Результати цієї операції представлені на Рис. 4.21.

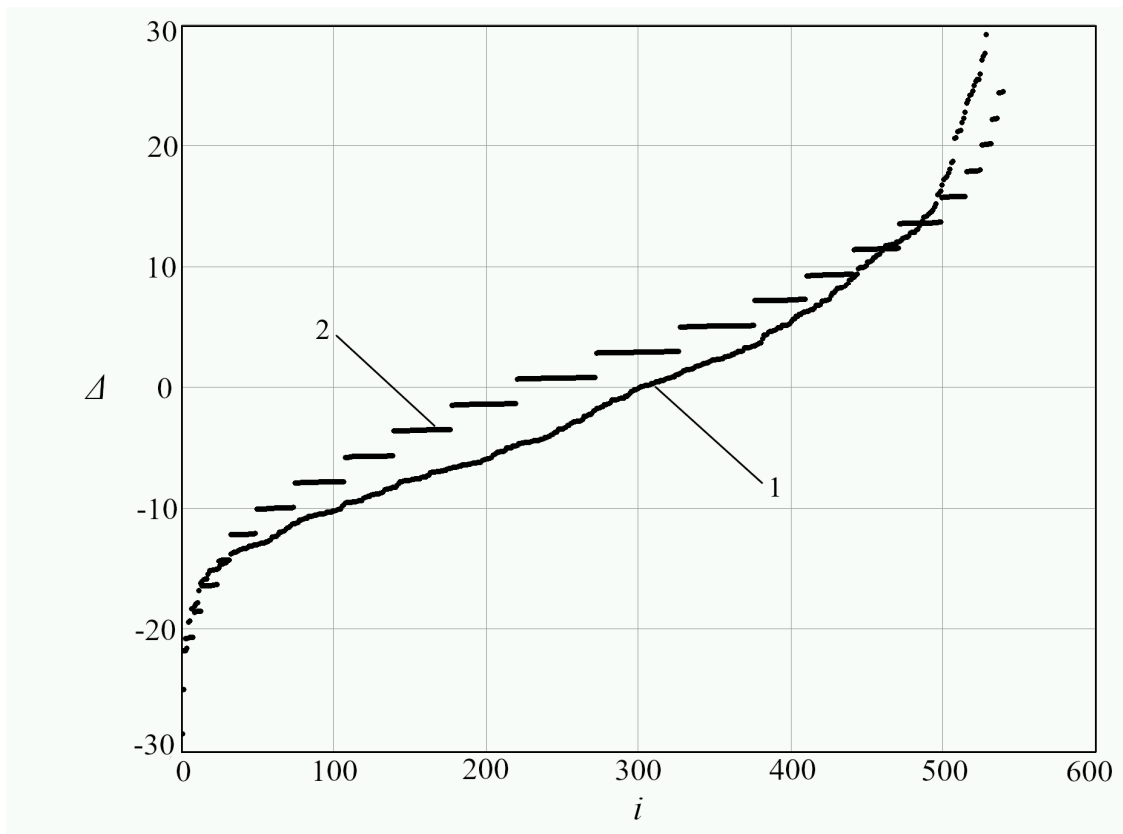


Рис. 4.21 Результат сортування даних експерименту для УГЭ-4 (лінія 1) і для світлодіодного джерела (лінія 2). Довжина кожного горизонтального штриха пропорційна кількості відліків, зареєстрованих цим розрядом.

Там відображені результати сортування із зростанням відліків для джерела з УГЭ-4 і для світлодіода. Для наочності значення відліків для світлодіода збільшені в 50 разів відносно УГЭ-4 (по вертикалі). В обох випадках відліки відображаються ізольованими точками, але в разі УГЭ-4 (лінія 1), коли статистичні шуми значно перевершують шуми квантування АЦП, вони зливаються в суцільну лінію, а для світлодіода (лінія 2), коли

шуми квантування і статистичні шуми одного порядку – вони відображаються сходинками.

На підставі цих даних була побудована більш детальна гістограма, зображена на Рис. 4.22 сходинками. На відміну від Рис. 2.11, де вона представлена теж сходинками, але з меншою роздільною здатністю, вона має не однакову ширину сходинки й більший масштаб. Ширина сходинки на Рис. 4.22 пропорційна кількості відліків, зареєстрованих у межах розряду. Загальна кількість сходинок перевищує два десятки, а довжина найдовшої сходинки більше 50-ти відліків.

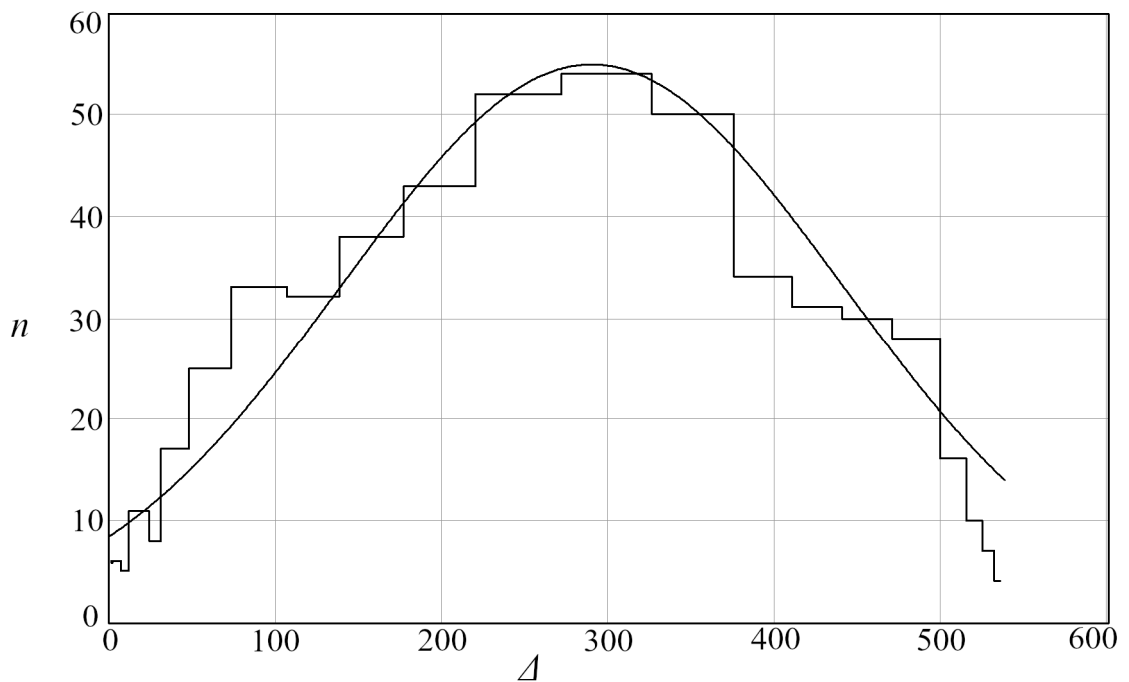


Рис. 4.22 Гістограма даних, зареєстрованих зі світлодіодним джерелом (сходинки). Найближча гаусіана – безперервна лінія

З цього випливає, що за умови, коли інтервал вимірюваних значень експериментального матеріалу у 20 разів перевищує міжрозрядний інтервал АЦП і загальна кількість вимірювань більше ніж 500, 12 – ти двійкових розрядів перетворювача достатньо для коректних вимірювань навіть світлодіодних джерел. Тим більше такої розрядності АЦП досить для реальних вимірів з дуговими та іскровими джерелами плазми.

Висновки до розділу 4

1. Розроблена та виготовлена оригінальна мультисенсорна камера з гнучкою архітектурою для реєстрації оптичних спектрів в лабораторних і промислових умовах. Камера здатна реєструвати спектр без розривів в спектральному діапазоні від 190 до 1100 нм.

2. Виявлено, що основним обмежувальним фактором динамічного діапазону в разі сильних сигналів є перевищення місткості елементів накопичення і перенесення фотоелектричних зарядів фотодетектора. До того ж шкідлива дія цього фактора позначається не тільки на амплітудних вимірах, але й на роздільній здатності детектора.

3. Запропоновано в процесі вимірювань здійснювати контроль нелінійностей трактів накопичення і перенесення заряду за виконанням принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції. Як встановлено в результаті дослідження, цей принцип є дуже чутливим індикатором не тільки в разі сильних, а й у випадку слабких сигналів. Це дозволяє оптимізувати діапазон експозицій реєстратора в залежності від характеру спектральних даних.

4. Запропоновано вибирати найменш схильні до дії перевантаження аналітичні параметри, із застосуванням методу максимальної правдоподібності.

5. Вперше експериментально встановлено, що для визначення температури кристала фотоприймача TCD1304AP, при роботі в реальних умовах, доцільно використовувати перевищення рівня темного струму над апаратним нулем. За результатами випробувань ця методика забезпечує точність кращу, ніж 1°C, і може бути реалізована не на апаратному, а на програмному рівні при одноразовому початковому калібруванні на стадії виготовлення апаратури.

6. Виконано порівняльні дослідження ПЗЗ сенсорів, що мають і не мають засоби придушення блумінга. Встановлено, що незважаючи на

розтікання зарядів уздовж ПЗЗ регістра, сенсори без антиблумінга TCD1304AP зберігають лінійність в більш широкому діапазоні, ніж ILX511 (Sony) і TCD1205 (Toshiba), що мають антиблумінг.

Основні результати розділу відображені в роботах автора [6, 9, 11, 12, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

РОЗДІЛ 5

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПЕКТРАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

У цьому розділі розглянуто завдання обробки результатів спектральних вимірювань в загальній спектрометричній постановці. Указано на специфіку реєстрації спектрів багатоеlementними фотоелектричними детекторами лінійної структури в порівнянні з фотографічними носіями. Відзначається важливість оптимального вибору аналітичного параметра. Розглянуто особливості прямокутного вікна згладжування, що часто застосовується [7]. Представлено опис методу максимальної правдоподібності стосовно розв'язання даної задачі. Пропонується оригінальний спосіб лінеаризації передавальної світлосигнальної функції при великих сигналах [11].

5.1 Загальна спектрометрична постановка задачі

Нехай функція розподілу спектральної потужності світлового сигналу $f(\lambda)$ (апаратна функція спектрографа) відображається в фокальній площині спектрографа як залежність $f(x)$, де координата x , спрямована уздовж дисперсії приладу. За допомогою багатоеlementного фотоелектричного детектора лінійної структури $f(x)$ перетворюється в одновимірну послідовність відліків електричного сигналу f_n , які є результатами інтегрування функції $f(x)$ по площі пікселя з порядковим номером n за час експозиції. Згідно з фотометричною термінологією – експозиція – це добуток тривалості витримки на світловий потік.

Згідно [200] передавальна характеристика такого детектора в загальному вигляді може бути представлена виразом:

$$f_n = \tau \cdot \left[\theta_n(T) + Q_n \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x + \varphi) dx \right] + N_n, \quad (5.1)$$

де: τ – витримка (тривалість експозиції), T – температура кристала, $\theta_n(T)$ – залежність темного струму від температури, а Q_n – світлосигнальна характеристика n -го пікселя лінійки фотодіодів, N_n – шумова компонента. φ – інструментальний параметр, який характеризує зсув зображення спектра щодо детекторної лінійки. Такі зсуви можуть бути навмисними – при скануванні спектра, або випадковими – від температурних і механічних впливів. Шумовий компонент – N_n містить шуми зчитування, шуми квантування АЦП, а також деяку постійну складову, яка в алгоритмі обробки даних допомагає виключити негативні значення світлового потоку.

Завдяки малим розмірам пікселів сучасних твердотілих фотоприймачів (близько 10 мкм) вони мають роздільну здатність кращих фотографічних матеріалів, а їх фотоелектричні параметри перевищують параметри вакуумних фотопомножувачів. У зв'язку з тим, що багатoelementні детектори світлового потоку хронологічно прийшли на зміну фотоплатівок, природно зберегти колишні методики обробки результатів вимірювань. Однак, результати досліджень, представлені в цьому розділі, свідчать про те, що необережне перенесення методик роботи з фотоплатівками на фотоелектричну реєстрацію може привносити додаткові похибки в кінцеві результати. Коли ширина пікселя наближається до ширини зображення спектральної лінії, виникають складнощі при коректній обробці фотометричних даних [7].

5.2 Аналітичний параметр

Основним параметром, за яким визначають склад аналізованої речовини, є інтегральний світловий потік в спектральних лініях. Для визначення процентного складу речовини необхідно виміряти відношення

величини світлового потоку в лінії досліджуваного елемента до його величини в лінії порівняння. Функція, що описує розподіл освітленості спектральної лінії в залежності від довжини хвилі має куполоподібну форму. Вона може бути представлена набором параметрів, які характеризують її амплітуду, напівширину, розташування на осі довжин хвиль, асиметрію та ін. Строго кажучи, оскільки спектральна лінія формується апертурою, що обмежена в просторі, у фокальній площині вона існує від мінус до плюс нескінченності й ніде нуля не досягає. З цієї причини необхідно шукати компромісне значення для величини інтервалу інтегрування при оцінці її енергетичних характеристик. Зазвичай він перевищує її напівширину за рівнем 0.5 амплітудного значення в 8–10 разів. Якщо при цьому всі точки підінтегральної функції мають однакову вагу, то говорять про прямокутне ядро згладжування. При широкому інтервалі інтегрування починає позначатися вплив постійної складової й прилеглих спектральних ліній.

Існує й інший шлях вирішення цього завдання – з використанням інтервалу інтегрування значно меншого півширини спектральної лінії. Цей спосіб правомірно застосовувати в ситуації, коли вимірювання є відносними й виконуються в лінійній області передавальної характеристики фотодетектора. У цьому випадку існує лінійна залежність між інтегральним і максимальним значенням функції, яка описує розподіл освітленості в лінії. Такий підхід часто реалізують при фотометруванні фотографічних знімків, використовуючи гранично вузьке вимірювальне вікно мікрофотометра. Фотометрування знімків на мікрофотометрі та фотометрування за допомогою лінійки фотодетекторів мають деякі суттєві відмінності.

При застосуванні фотодіодної лінійки ширину вікна не можна зробити довільно малою, вона завжди кратна ширині окремого пікселя. Це наочно ілюструє Рис. 5.1, де представлені дві реалізації одного і того ж спектру ртутної лампи, що зображують пару жовтих ліній спектру ртуті з довжиною хвилі 576.96 нм. (зліва) і 579.07 нм. (справа).

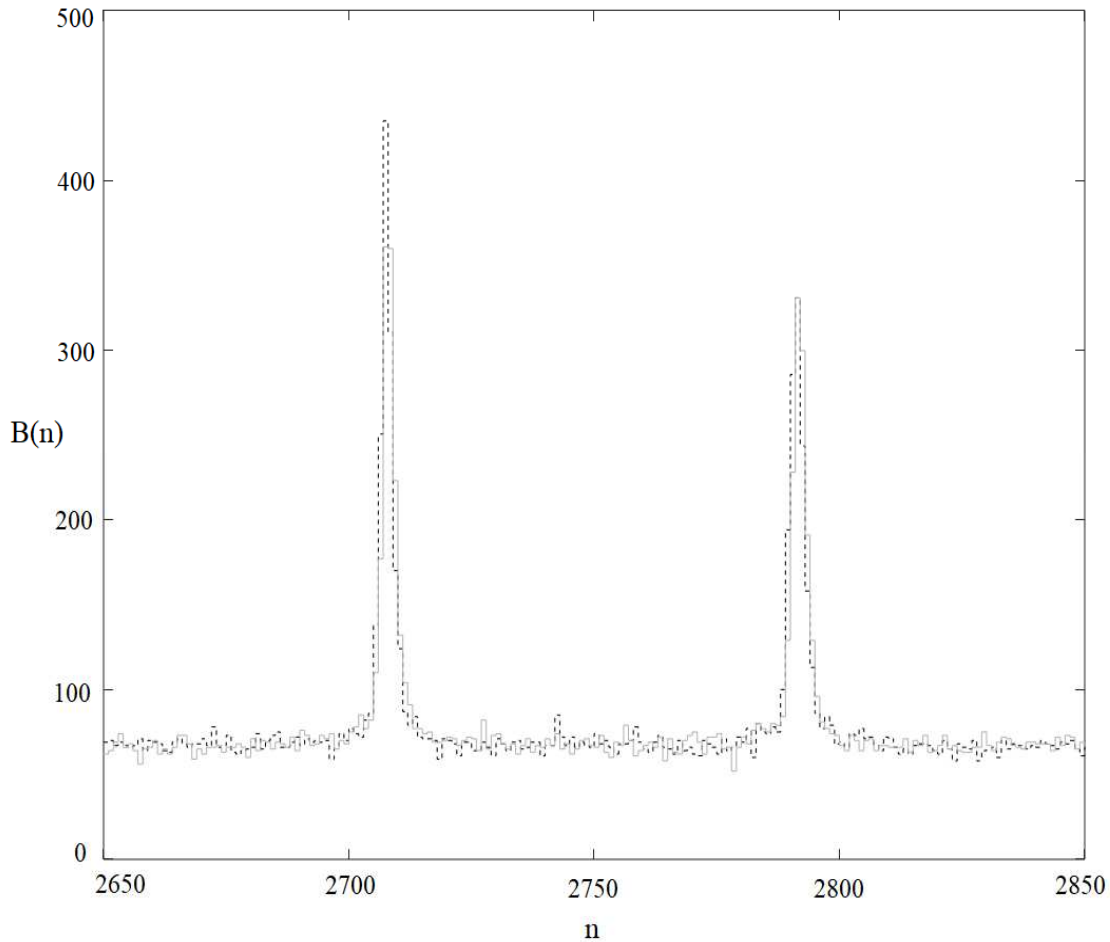


Рис. 5.1 Фрагменти двох реалізацій спектра газорозрядної лампи; по осі абсцис відкладений порядковий номер пікселя n детекторної лінійки, що реєструється, по осі ординат – результати вимірювання фотоструму на відповідному пікселі $B(n)$. Перша реалізація зображена пунктирною лінією, а друга неперервною.

Величина фотоструму пропорційна світловому потоку на даному пікселі. Перша реалізація зображена пунктирною лінією, а друга неперервною. Обидві реалізації отримані при різних положеннях одного і того ж спектру щодо реєструючої лінійки. Такі взаємні неконтрольовані переміщення в кілька мікрон відбуваються між експозиціями під впливом механічних і / або температурних впливів. З рисунка слідує, що вид спектра сильно змінюється в залежності від його розташування щодо пікселів лінійки. У зв'язку з тим, що, в більшості випадків, центр пікселя не збігається з точкою максимуму спектральної лінії, немає можливості коректно провести оцінку світлового потоку по його значенню в максимумі зареєстрованої

функції, як це роблять при фотометруванні фотоплатівок, що мають велику кількість фоточутливих зерен фотоемульсії довільної форми. Як впливає зрисунок в результаті зсуву амплітуда однієї лінії зросла приблизно на 25%, а інша залишилася практично незмінною. Випадковий характер зсуву може призводити до деякої фотометричної помилки обчислювального характеру не тільки при вузькому, але і при широкому ядрі згладжування. Величина такої помилки може залежати й від виду функції, яка описує освітленість в спектральній лінії. Аналіз цих факторів представлений в наступному підрозділі.

5.3 Прямокутне ядро згладжування і нормальний розподіл яскравості в лінії

Припустимо, що розподіл освітленості в вимірюваній лінії $B(\lambda, \rho)$ підпорядковується нормальному закону:

$$B(\lambda, \rho) = A \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\lambda - \Lambda}{\rho} \right)^2}, \quad (5.2)$$

де: λ – довжина хвилі, A – амплітудне значення освітленості, Λ – координата максимуму спектральної лінії, ρ – напівширина спектральної лінії. Позначимо через φ різницю між координатою вершини спектральної лінії і центром найближчого пікселя. Назвемо цю різницю фазою – φ . У цьому припущенні спектральну лінію характеризують три параметри: A , φ , ρ . При проведенні фотометричних робіт основний інтерес представляє параметр A , або величина з ним пов'язана. Величину фази вибором номера пікселя завжди можна зробити меншою його півширини по модулю. Величина ρ зазвичай знаходиться в межах від одиниці до двох, якщо ширину пікселя прийняти за одиницю.

Випадок, коли $\rho \leq 1$ може свідчити про неузгодженість роздільної здатності оптики й детектора. Це буває при застосуванні висококласного спектрометра і недосконалого (з великими пікселями) детектора. Тоді залишається недовикористаною роздільна здатність оптики інструменту. І навпаки, при $\rho \geq 2$ маємо перевагу детектора над спектрометром, тобто інструмент має надмірну кількість пікселів.

Здавалося б надмірність кількості пікселів нічому не заважає, але при заданому числі лінійок, це тягне за собою у підсумку звуження спектрального діапазону приладу. Для пошуку оптимального розв'язання цієї проблеми розглянемо її більш детально.

Запровадимо величину δA , яка дорівнює відхиленню від одиниці нормованого значення інтеграла функції $B(\lambda, \rho)$ по симетричному інтервалу який дорівнює k пікселям. За умови, що ширина пікселя дорівнює одиниці, отримаємо:

$$\delta A(\varphi, \rho, k) = 1 - \frac{\int_{\varphi-k/2}^{\varphi+k/2} B(\lambda, \rho) d\lambda}{\int_{-k/2}^{k/2} B(\lambda, \rho) d\lambda}. \quad (5.3)$$

Залежність величини δA від фази для значення $k=3$ представлена на Рис. 5.2. З графіків випливає, що величина δA монотонно зростає зі збільшенням фази, в першому наближенні квадратично, і для різних значень ρ по-різному.

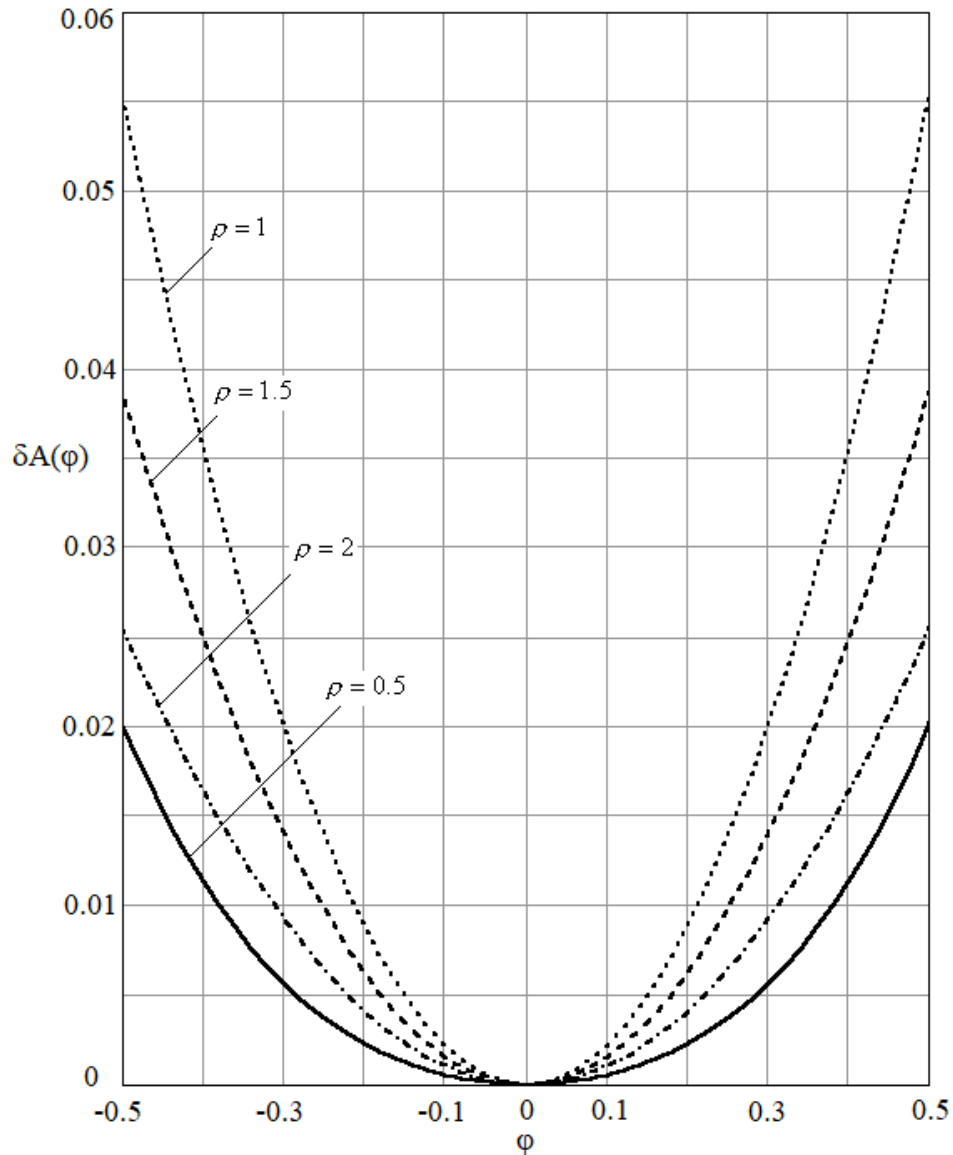


Рис. 5.2 Залежність невизначеності значення амплітуди спектральної лінії від її фази [7]

Це свідчить про те, що для попереднього обчислення δA , з метою подальшого врахування його впливу на результат визначення амплітуди, необхідно знання не тільки фази, але і півширини спектральної лінії. Якщо в експерименті ці параметри не визначаються, то величину максимального значення цієї компоненти $\delta A_{max}(\rho) = \delta A(\rho, |\varphi| = 0.5)$ доводиться розглядати як компоненту відносного стандартного відхилення при визначенні амплітуди.

Залежність величини цієї компоненти $\delta A_{max}(\rho)$ від півширини спектральної лінії для різних k представлена набором кривих на Рис. 5.3.

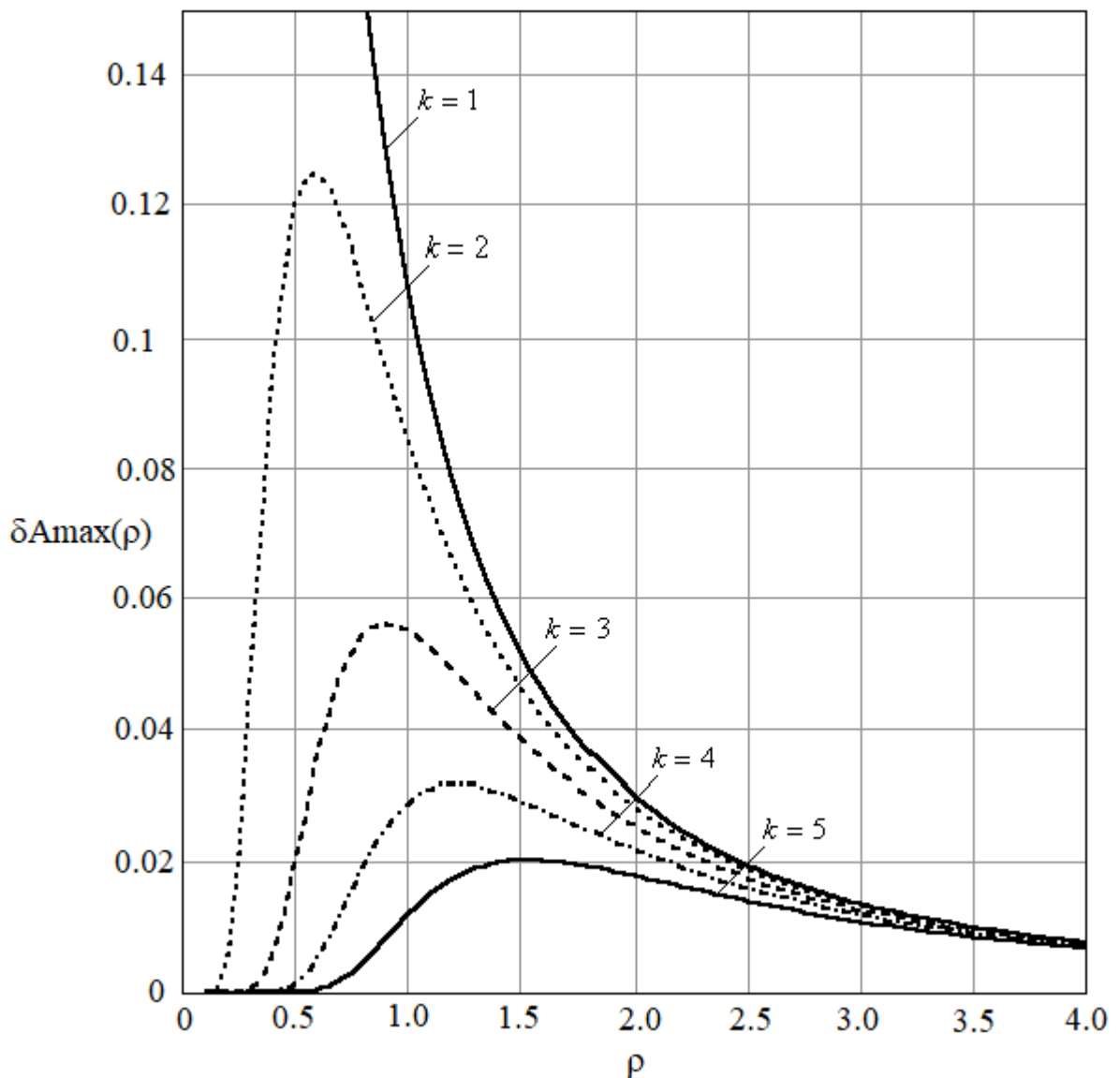


Рис. 5.3 Залежність величини максимального значення невизначеності амплітуди від півширини спектральної лінії для вікна інтегрування рівного k [7]

У разі $k = 1$ ми в максимальному ступені виключаємо вплив довколишніх ліній, але δA_{max} може досягати 0.5. Цього і слід було очікувати, тому що спектральна лінія може потрапити в одному випадку на центр пікселя, а в іншому на лінію, що розділяє пікселі. Така ситуація спостерігається на Рис. 5.1 для лінії з $\lambda = 576.96$ нм, максимальне значення якої припадає на піксель № 2707. При $k = 2$ помилка може досягати 0.125, що теж не прийнятно для більшості спектральних визначень. Випадок $k = 3$

використаний в роботі [201] і може застосовуватися тільки при виконанні вимірювань з помилкою до 0.06, якщо не уникати значень $0.4 \leq \rho \leq 3.4$. У згаданій роботі мова йде про аналіз геологічних зразків і помилка в 0.06 є цілком прийнятною. Але таке її значення вже стає неприпустимим при аналізі металевих зразків, де ГОСТ встановлює бар'єр для величини відносного стандартного відхилення близько 0.03. Розширення вікна згладжування до значення $k=5$ знижує рівень розглянутої компоненти помилки до 0.02, що є достатнім при проведенні багатьох експериментів. При цьому слід пам'ятати, що за таку точність необхідно платити п'ятикратною втратою роздільної здатності в порівнянні з випадком $k = 1$.

5.4 Обробка результатів вимірювань методом максимальної правдоподібності при лінійній світлосигнальній передавальній характеристиці реєстратора

Більш оптимальне розв'язання задачі одночасного визначення всіх параметрів спектральної лінії, що нас цікавлять, може бути отримане із застосуванням методу найменших квадратів [202].

Нехай апаратна функція спектрометра залежить від координати x і деякої кількості параметрів p_α , тобто має вигляд: $f(x, p_\alpha)$, де α – порядковий номер параметра. У процесі реєстрації спектра ми виконуємо n вимірювань в точках x_i ($1 \leq i \leq n$) з деякою середньоквадратичною помилкою ε_i . За цими даними отримаємо послідовність n відліків:

$$f_i = f(x_i, p_\alpha) + \varepsilon_i, \quad (5.4)$$

де: ε_i – помилка окремого виміру. Відповідно до підходу, викладеному в [202] знайдемо найбільш імовірні значення параметрів, мінімізуючи квадрат суми відхилень між апіорними даними та вимірюваними значеннями. В цьому випадку логарифмічна функція правдоподібності має вигляд:

$$L(x, p_\alpha) = \text{const} - \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \cdot \sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i]^2, \quad (5.5)$$

де: σ^2 – потужність нормального шуму.

Для визначення набору параметрів, які мінімізують (5.5), прирівняємо нулю часткові похідні функції правдоподібності за всіма параметрами. В результаті отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i] \cdot \frac{\partial f(x_i, p_\alpha)}{\partial p_\alpha} = 0. \quad (5.6)$$

Розв'язок цієї системи дасть набір найбільш ймовірних значень шуканих параметрів $\overline{p_\alpha}$. Характеристикою величини помилки визначення параметра є величина другої похідної функції правдоподібності по відповідному параметру при $p_\alpha = \overline{p_\alpha}$:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial p_\alpha^2} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(x_i, p_\alpha)}{\partial p_\alpha} \right]^2. \quad (5.7)$$

Наприклад, коли мова йде про точність координатної реєстрації спектральної лінії, то найбільш важливим параметром є розташування її зображення в фокальній площині спектрографа. Параметр, який характеризує величину зміщення зображення лінії щодо осі інструмента, назовемо фазою ϕ і функція правдоподібності запишеться так:

$$L(x, \phi) = \frac{A^2}{2 \cdot \sigma^2} \cdot \sum_{i=1}^n [f(x_i, \phi) - f_i]^2 \quad (5.8)$$

Оцінка дисперсії визначення фази дорівнює:

$$D_\phi \sim \frac{\sigma^2}{A^2} \cdot \frac{1}{\sum_i \left[\frac{\partial f(x_i, \phi)}{\partial \phi} \right]^2}. \quad (5.9)$$

Середньоквадратична помилка визначення фази $\Delta\phi$ дорівнює кореню квадратному з дисперсії:

$$\Delta\phi \sim \frac{\sigma}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_i \left[\frac{\partial f(x_i, \phi)}{\partial \phi} \right]^2}}. \quad (5.10)$$

З останнього виразу можна зробити висновки щодо впливу на координатну точність фази ($\Delta\phi$), фотометричної точності (σ/A) і похідної апаратної функції ($\frac{\partial f(x_i, \phi)}{\partial \phi}$). Координатна точність знаходиться в прямій пропорції з фотометричною точністю, яка залежить від яскравості лінії, тривалості експозиції та інших факторів. При одній і тій же помилці фотометрування помилка визначення положення спектральної лінії різна, залежно від похідної апаратної функції по фазі в виразі (5.10), що визначається, в основному, формою спектральної лінії.

Інформація про розташування спектральної лінії грає велику роль при розшифровці спектра і його обробці. Зазвичай емісійний спектр є дуже насиченим і часто доводиться розв'язувати проблеми, пов'язані з накладенням ліній. Ці проблеми посилюються нелінійностями передавальної функції детектора при сильних сигналах.

При вимірюванні амплітуди сигналу в разі лінійної передавальної характеристики детектора апаратну функцію спектрометра $f(x, p_\alpha)$ можна представити у вигляді:

$$f(x, p_\alpha) = A \cdot v(x), \quad (5.11)$$

де: параметр A – це амплітудна характеристика спектральної лінії, $v(x)$ – нормована по максимальному або за інтегральним значенням функція, яка описує розподіл яскравості спектральної лінії уздовж дисперсії. Якщо ми не виходимо за межі лінійної області детектора, то $v(x)$ не залежить від амплітуди і рівняння (5.5) запишеться у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, A) - f_i] \cdot v(x_i) = 0. \quad (5.12)$$

З огляду на (5.11), з точністю до константи, отримаємо:

$$A \sim \sum_i f_i \cdot v(x_i). \quad (5.13)$$

Останній вираз описує в рамках методу максимальної правдоподібності процедуру згладжування експериментальних даних стаціонарним ядром $v(x)$. Як ядро згладжування $v(x)$ часто застосовують функцію $rect(x)$ (коли використовують підсумовування по деякому числу пікселів), або функцію нормального розподілу Гауса [7], як це представлено в попередньому підрозділі.

5.5 Лінеаризація світлосигнальної передавальної функції ПЗЗ детектора при великих сигналах

У зв'язку з тим, що амплітуди великого числа аналізованих ліній і ліній порівняння відрізняються великою різноманітністю, необхідно мати відповідний динамічний діапазон для їх неспотвореного одночасного фотометрування. Якщо це зробити неможливо, доводиться вдаватися до процедури лінеаризації з використанням даних про дотримання закону взаємозамінності, подібних зображенням на Рис. 4.19. Аналогічну процедуру доводиться робити й при використанні сенсорів з антиблумінгом [196]. Наявність антиблумінгу завжди передбачає їх нелінійну світлосигнальну характеристику за рахунок зливу заряду, що перевищує певне значення. Але всякого роду втрати, і заряду в тому числі, негативно позначаються на точності. У цьому сенсі ПЗЗ реєстратори без антиблумінга більш повно реєструють генерований світлом заряд, хоча це призводить до розширення і несиметричної деформації ліній спектра. Особливо шкідливим є розповзання заряду в одну сторону, тому що це маскує сусідні лінії. Для вивчення цього явища була проведена одночасна реєстрація спектра на дві лінійки повернуті на 180° . Отримані при цьому результати фотометрування дуже яскравої лінії представлені на Рис. 5.4.

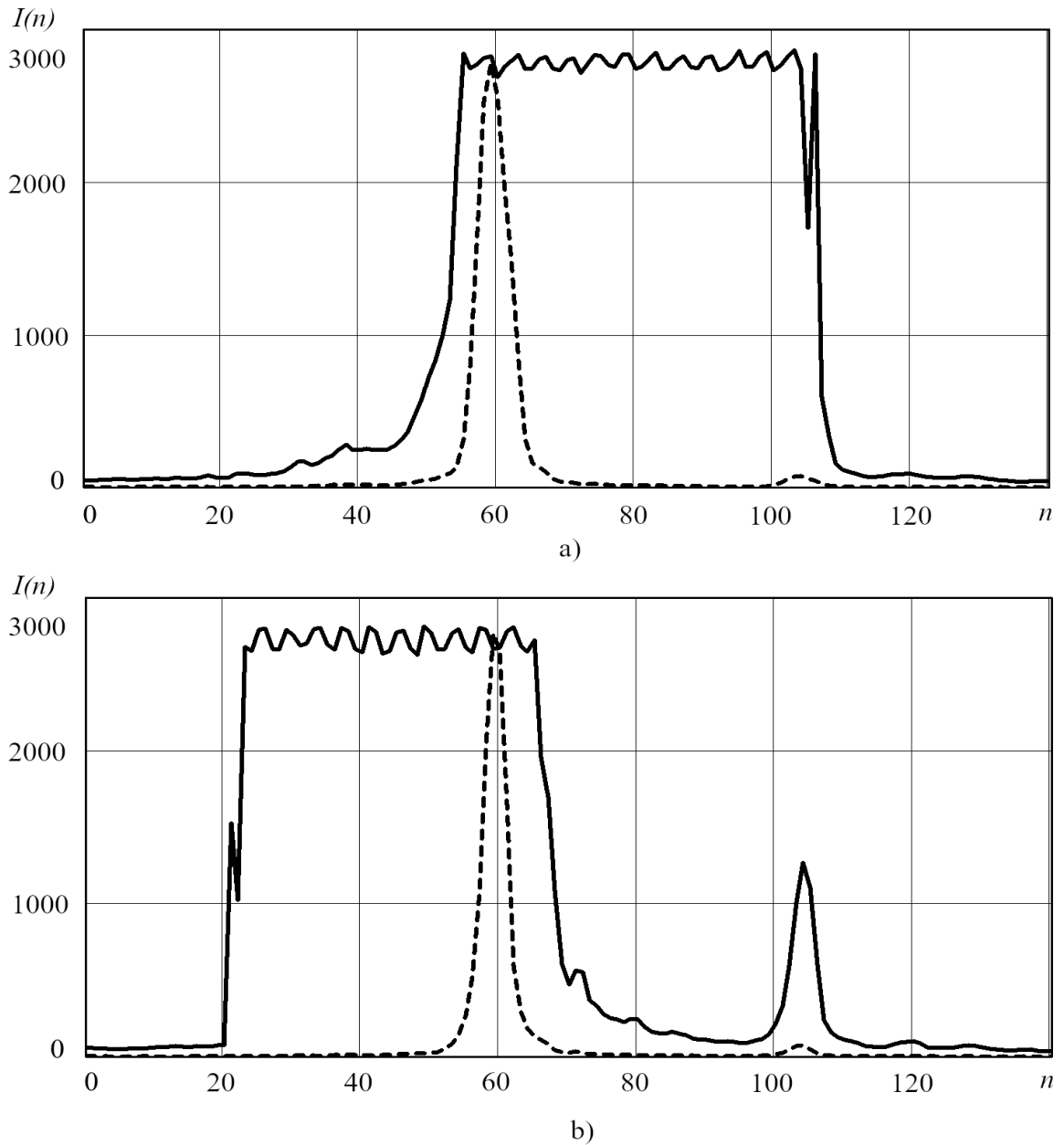


Рис. 5.4 Суцільною лінією зображено спектр з витримкою 4 сек. в умовах розтікання заряду, а пунктиром – з витримкою 0.25 сек. в умовах близьких до лінійного режиму. Верхній графік (a) – напрям зсуву в транспортному реєстрі вправо, нижній графік (b) – зсув вліво.

На цьому рисунку зображена одна і та ж лінія з двома витримками при транспортуванні заряду в протилежних напрямках. Якщо ці два рисунки уможлядно розрізати симетрично щодо спектральної лінії зареєстрованої на лінійній ділянці світлосигнальної характеристики (зображена пунктиром), а

потім скласти по лінії розрізу, то з отриманих двох графіків можна скласти один, представлений на Рис. 5.5

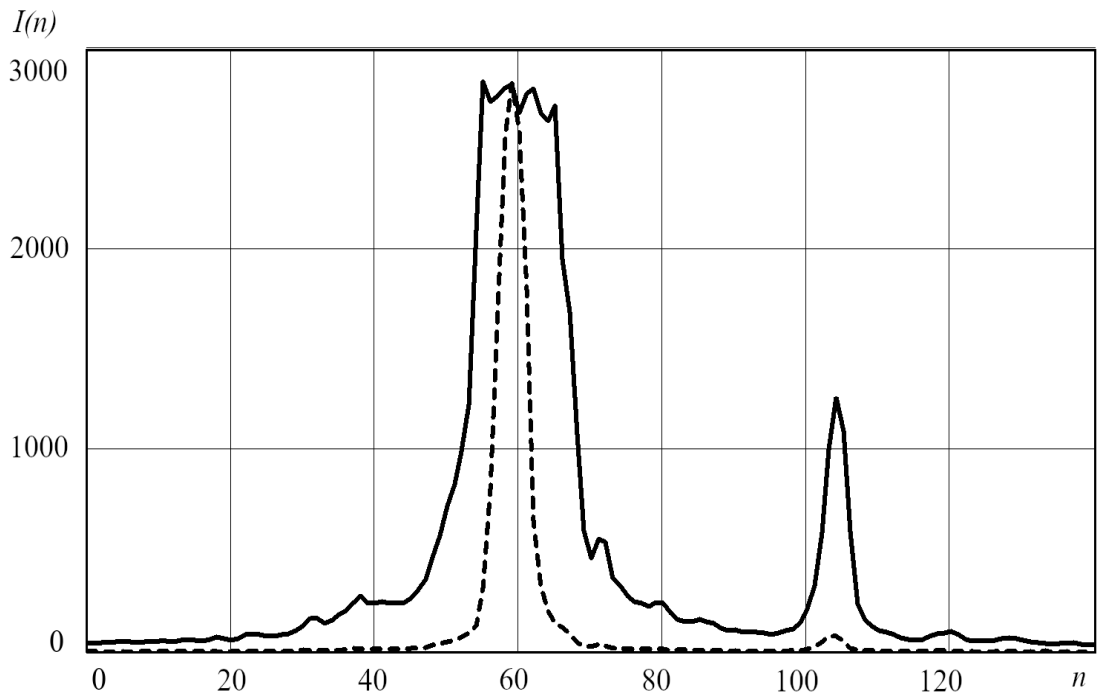


Рис. 5.5 Суцільною лінією зображено спектр з великою витримкою, скомпільований з неспотворених частин сильно пересвіченої спектральної лінії рисунка 5.4. Пунктиром позначена та сама спектральна лінія з малою витримкою.

Якщо для виконання цієї процедури використовувати інструменти методу найменших квадратів, то можна сподіватися на її достатню коректність. «Відрізану» частину теж не слід викидати – її доцільно використовувати для оцінки амплітудного параметра. Таким чином, для оцінки площі під спектральною кривою наявність блумінга можна перетворити з недоліку в перевагу. В результаті отримаємо лінійно зареєстровані слабкі лінії й відновлені рідко розташовані сильні лінії. Амплітудні характеристики цих сильних ліній можуть бути відновлені з залученням даних про їх розширення (Рис. 4.18) і про дотримання закону взаємозамінності (Рис. 4.19), що дозволить у рази збільшити динамічний діапазон. Ступінь можливого розширення залежить від виду спектра і більш

надійний висновок про можливість застосування цього методу можна буде зробити тільки за результатами його практичного застосування. Наприклад, за даними Рис. 5.4 яскрава спектральна лінія за рахунок блумінгу уширюється приблизно в шістнадцять разів і тому можна сподіватися на таке ж збільшення динамічного діапазону. Насправді воно буде дещо менше через втрати, пов'язані з недотриманням закону взаємозамінності, які, судячи з Рис. 4.19, можуть доходити до 40%. У конкретному випадку, представленому на Рис. 5.4, відношення площ під суцільною лінією до площі під пунктирною лінією становить ~ 14.7 . Таким чином, в результаті виконання описаних перетворень отримуємо лінеаризовану версію спектра зі збільшеним динамічним діапазоном. Для остаточної обробки лінійної версії спектра найкраще застосовувати метод максимальної правдоподібності [202], викладений вище стосовно до нашого завдання. Це підтверджується також однією з основних властивостей цього методу, яке свідчить про те, що якщо існує достатня та ефективна оцінка параметра, то цей метод дає саме цю оцінку і більш точної оцінки знайти неможливо [203].

З наведеного в цьому розділі розгляду слідує, що спрощене розв'язання задачі аналізу спектральних даних з використанням прямокутного згладжуючого ядра тягне за собою ризик помилки обчислювального характеру. У деяких випадках пов'язана з цим компонента відносного стандартного відхилення може досягати половини амплітуди. Збільшенням ширини прямокутного ядра згладжування вона може бути зменшена до прийнятних величин, але зробити це можна або за рахунок втрати роздільної здатності, або за рахунок зменшення спектрального діапазону приладу (якщо кількість каналів фотоприймача фіксована). Для коректного вирішення завдання визначення амплітуди спектральної лінії необхідно залучати дані про її положенні щодо пікселів і її напівширину.

Сформульовані в цьому розділі закономірності мають загальний характер і виявляють себе подібним чином при дослідженні частотних характеристик сигналів різного походження.

Висновки до розділу 5

1. Запропоновано використання методу максимальної правдоподібності стосовно розв'язання задачі фотометрування спектрів. Представлена залежність точності визначення фази й амплітуди від форми спектральної лінії та співвідношення сигнал / шум як основних параметрів лінії, що визначаються.

2. Встановлено, що процедура згладжування експериментальних даних згорткою зі стаціонарним ядром, яке описує форму спектральної лінії, призводить до того ж результату, що і застосування методу максимальної правдоподібності.

3. Вперше запропоновано спосіб лінеаризації передавальної світлосигнальної функції при великих сигналах. Для цього необхідно організувати паралельну реєстрацію із зустрічним транспортуванням зарядів в ПЗЗ детекторах. Це дозволяє компенсувати асиметричні спотворення перевантажених ділянок спектру і суттєво, (більш ніж в 10 разів) розширити динамічний діапазон реєстрації.

4. Актуальність викладених в даному розділі результатів обумовлена потребами повсякденних завдань спектрального аналізу. Отримані результати були використані при розробці спектрофотометричної апаратури й алгоритмів обробки експериментальних даних.

Основні результати розділу відображені в роботах автора [6, 7, 8, 12, 17, 18, 22, 27].

ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень розв'язано низку важливих науково-технічних задач вдосконалення методів і апаратури АЕСА як одного з найпоширеніших засобів контролю елементного складу речовини. При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

1. Вперше розроблено спосіб збільшення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів при реєстрації спектрів, який складається з апаратної модернізації спектрометра, що дозволяє виконати мікрометричний зсув зображення спектра щодо пікселів детекторних лінійок, а також алгоритму обробки спектральних даних. Це відкриває можливість отримання субпіксельного розділення спектральних зображень аж до повної оптичної роздільної здатності спектрального приладу. Експериментально отримана роздільна здатність, що у два рази перевищує роздільну здатність фотоприймача.

2. Вперше експериментально встановлено, що для визначення температури кристала фотоприймача TCD1304AP, при роботі в реальних умовах, доцільно використовувати перевищення рівня темного струму над апаратним нулем. За результатами випробувань ця методика забезпечує точність кращу, ніж 1°C і може бути реалізована без застосування додаткових температурних датчиків. Це дозволяє компенсувати вплив деяких заважаючих чинників і підвищити точність аналізів в лабораторних і заводських умовах.

3. Вперше запропоновано спосіб лінеаризації передавальної світлосигнальної функції ПЗЗ фотоприймачів, що не мають антиблумінга, при великих сигналах. Для цього необхідно організувати паралельну реєстрацію із зустрічним транспортуванням зарядів в ПЗЗ детекторах. Це дозволяє компенсувати асиметричні викривлення перевантажених ділянок спектру і суттєво, більш ніж у десять разів, збільшити динамічний діапазон фотоприймачів.

4. Отримали подальший розвиток методи контролю нелінійностей трактів накопичення і перенесення заряду фотоприймачів з виконання принципу взаємозамінності яскравості ліній і тривалості експозиції. Як показано в результаті дослідження, цей принцип є дуже чутливим індикатором не тільки в разі перевантаження, а й у випадку слабких сигналів. Це дозволило знайти пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ і оптимізувати діапазон експозицій реєстратора в залежності від характеру спектральних даних.

5. Спроектовано оптичну схему і виготовлено спектрогеліограф для спостереження Сонця одночасно у двох лініях спектра, що дозволяє одержувати одночасно два зображення сонячної фотосфери на різних її глибинах.

Виконано розробку, виготовлення і впровадження комплексу спектральної апаратури, що має істотні переваги перед існуючими зразками й складається з:

- Дугового імпульсного генератора плазми з цифровим програмним керуванням параметрами розряду, що має широкий діапазон регулювання параметрів збудження плазми. Генератор має удосконалену схемотехніку формування розрядного струму з підвищеною стабільністю і швидкодією, що дає змогу розширити діапазон енергій збуджуваних спектральних ліній. За результатами порівняльних випробувань точність вимірювань за допомогою розробленого генератора перевищує точність з використанням серійного генератора УГЭ-4, в три рази.

- Декількох варіантів оптичних блоків з неklasичною дифракційною ґраткою і схрещеною дисперсією. В результаті використання ґратки з криволінійними штрихами й нерівномірним кроком нарізки вдвічі зменшено розміри спектрометра з одночасним зменшенням аберацій і поліпшенням оптичної роздільної здатності. Виконані розрахунки й макетування декількох оптичних схем зі схрещеною дисперсією, показані їх переваги в поєднанні з сучасними матричними сенсорами.

- Оригінальної мультисенсорної камери з гнучкою архітектурою для реєстрації оптичних спектрів в лабораторних і промислових умовах, яка здатна реєструвати спектр без розривів в діапазоні від 190 до 1100 нм.

Актуальність отриманих результатів обумовлена потребами повсякденних завдань спектрального аналізу. Результати досліджень і розроблені методики були використані при розробці спектрофотометричної апаратури та алгоритмів обробки експериментальних даних. Понад два десятки комплектів спектральної апаратури розробленої й виготовленої за участю автора було поставлено на промислові підприємства і лабораторії України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воропай, Е. С. Ермалицкая К. Ф., Зажогин А. П., Патапович М. П., Фадаиян А. Р. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ. Научное и практическое применение // Вестник Белорусского государственного университета. Минск, Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2009. № 1. С. 14–20.
2. Барсуков В. И. Атомный спектральный анализ. Москва, 2005. 109 с.
3. Зайдель А. Н. Основы спектрального анализа. Москва, 1965. 324 с.
4. Аналитическая химия. Проблемы и подходы : в 2 т. Т. 1 / ред. Р. Кельнер, Ж.-М. Мерме, М. Отто, Г. М. Видмер ; пер. с англ. А. Г. Борзенко [и др.] под ред. Ю. А. Золотова. Москва, 2004 . 608 с.
5. Чудновский С. М., Лихачева О. И., Приборы и средства контроля за природной средой: учеб. пособие. Москва, 2017. 152 с.
6. Егоров А. Д., Моторненко А. П., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В., Корж В. Г., Скуратовский И. Г. Автоматизированный спектрометр для эмиссионного спектрального анализа // Радиофизика и электроника. 1999. Т. 4, № 3. С. 148–153.
7. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками // Радиофизика и электроника. 2002. Т. 7, № 2. С. 422–425.
8. Yegorov A., Yegorov V., Yegorov S. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 1. С. 77–83.
9. Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельніков І. Є. Дослідження можливості компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів

оптичного спектру // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2019. № 5–6. С. 8–15.

10. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Экспериментальное исследование газоразрядной антенны на парах ртути с низкочастотным возбуждением плазмы // Прикладна радіоелектроніка. 2019. Т. 18, № 3–4. С. 190–196.

11. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Є. Дуговой генератор плазмы атомно-емісійного аналізатора з цифровим керуванням параметрами розряду // Радіофізика та електроніка. 2020. Т. 25, № 3. С. 78–88. DOI : doi.org /10.15407/rej2020.03.078

12. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников спектра атомно-эмиссионных анализаторов. // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 3. С. 410–416.

13. Акимов Л. А., Егоров А. Д., Егоров В. А. Проект спектрогелиографа // Солнце и космическая погода: конференция памяти академика Андрея Борисовича Северного, 9–14 июня. 2003 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2004. Т. 100, № 1. С. 233.

14. Акимов Л. А., Белянкин И. П., Егоров А. Д., Егоров В. А. Еленская Л. И., Здор Е. В., Железняк А. П., Коничек В. В., Корохин В. В., Синельников И. Е. Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 52.

15. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Получение субпиксельного разрешения при регистрации изображений спектров фотодиодными структурами // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы

международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 51.

16. Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Функциональные и конструкционные материалы : материалы 3-й международной научно-технической конференции НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ, 11–14 ноября 2013 г., Донецк, 2013. С. 85.

17. Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Реконструкция спектров излучения при заданных ограничениях на аппаратную функцию системы регистрации // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике : VIII Всероссийские Арmandовские чтения, 26–28 июня 2018 г., Муром. С. 7–9. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2018/tezis-2018/pdf/T_1.pdf

18. Егоров А. Д., Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Влияние температуры на чувствительность CCD сенсоров фирмы Toshiba TCD1304AP и TCD1304DG. // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 625–629. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_38.pdf

19. Егоров С. А., Егоров В. А. Исследование нелинейности чувствительности ПЗС сенсоров TCD1304 и влияющих на нее факторов // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 635–638. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_40.pdf

20. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Плазменная антенна с парами ртути вида полувибратора Пистолькорса на металлическом экране // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские

чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 580–587. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_31.pdf

21. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Корж В. Г., Моторненко А. П. Автоматизированный спектрометр на основе спектрографа ИСП-28 // Авиационно-космическая техника и технология. 2000. Вып. 18. С. 235–241.

22. Егоров В. А., Егоров С. А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр // Наука та інновації. 2008. Т. 4, № 2. С. 33–39.

23. Андрющенко А. Ю., Бланк А. Б., Глушкова Л. В., Шевцов Н. И., Штительман З. В., Егоров А. Д., Егоров В. А., Здор Е. В. О преимуществах фотоэлектрической регистрации атомно-эмиссионных спектров для анализа функциональных материалов и объектов окружающей среды // Методы и объекты химического анализа. 2008. Т. 3, № 2. С. 157–162.

24. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць. 2014. Вип. 48(2). С. 74–80. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/10757>

25. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Телескопы видимого и инфракрасного диапазонов для обнаружения экзопланет земного типа // Радиофизика и радиоастрономия. 2016, Т. 21, № 1. С. 14–23. URL : <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1230>

26. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е., Бабаков М. Ф. Мультисенсорная камера для спектральных измерений на приборах с зарядовой связью линейной структуры // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2019. Т. 90, № 2. С. 80–88. doi: 10.32620/reks.2019.2.07

27. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Удосконалені методики обробки даних в оптичних спектрометрах // Вчені

записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 3, Ч. 1. С. 46–50

28. Родзевич А. П., Газенаур Е. Г. Методы анализа и контроля веществ. Томск, 2013. 312 с.

29. Новый справочник химика и технолога. 1. Аналитическая химия. Часть 2. Под ред. И. Л. Калинкина. Санкт-Петербург, 2005. 1264 с. URL : http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/03_analiticheskaya_khimiya_chast_II/5030 (дата звернення 19.05.2020).

30. Большаков А. А., Ганеев А. А., Немец В. М. Перспективы аналитической атомной спектроскопии // Успехи химии. 2006. Т. 75, № 4. С. 322–338.

31. Алов Н. В. и др. Основы аналитической химии. В 2 т. / под ред. Ю. А. Золотова. 5-е изд. Москва, 2012. Т. 2. 416 с.

32. Мандельштам С. Л. Введение в спектральный анализ Москва, Ленинград, 1946. 262 с.

33. Свентицкий Н. С. Визуальные методы эмиссионного спектрального анализа. Москва, 1961. 315 с.

34. Марукович Е. И. Непокойчицкий А. Г. Эмиссионный спектральный анализ. Минск, 2013. 308 с.

35. Универсальный источник возбуждения спектра УГЭ-4, «Инструкция по эксплуатации». Москва, 131 с.

36. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Москва, 1992. 536 с.

37. Иванов В. А., Сухомлинов В. С. Дуговые генераторы. Новое поколение генераторов дугового разряда ПРИМА для спектрального эмиссионного анализа элементного состава веществ. // URL : <http://prima-ivs.ru/content/view/21/48/> (Дата звернення: 29.09.2017)

38. Мандрик Е. М. Семейство электрических источников возбуждения атомно-эмиссионных спектров «Шаровая молния» // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, № 2. С. 129–134.

39. Капранов Б. И. Короткова И. А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. Томск, 2008. 122 с.
40. Иванов В. А. Сухомлинов В. С. Генераторы дугового разряда нового поколения Прима для спектрального эмиссионного анализа элементного состава вещества // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 6. С. 18–21.
41. Дробышев А. И. Основы атомного спектрального анализа. Санкт-Петербург, 2000. 200 с.
42. Буравлев Ю. М. Основы атомно-эмиссионного спектрального анализа металлов и сплавов. Донецк, 2001. 438с.
43. Зайдель А. Н. Шрейдер Е. Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. Москва, 1976. 432 с.
44. Буравлев Ю. М. Уменьшение влияния структуры и состава пробы при спектральном анализе сплавов путем вариации параметров источника // Сталь. 1966, № 10. С. 939–942.
45. Бабанская Л. Н. Исследование структуры и состава сплавов в зоне воздействия низковольтного искрового разряда в аргоне : дис. кандидата тех. наук : Киев, 1980. 139 с.
46. Буравлев Ю. М., Милославський О. Г. Атомно-емісійний спектральний аналіз металів і сплавів / за ред. Ю. М. Буравлева. Донецьк, 2002. 362 с.
47. Закс М. И. и др. Трансформаторы для электродуговой сварки. Ленинград, 1988. 136 с.
48. Беляков-Бодин И. Б. Мандельштам С. Л. Влияние балластного сопротивления на температуру дуги; стабилизированные выпрямители для питания дуг // Изв. АН СССР, сер. физ. и Ж.Т.Ф.Х. 1941. Т. 229. С. 332.
49. Малышев Г. М. и др. О применении выпрямленной конденсированной искры для спектрального анализа сплавов // Заводская лаборатория. 1963. Т. 24, № 8. С. 1005–1006.

50. Progress in analytical atomic spectroscopy / Ed. by C.L.Chakrabarti: Pergamon Press Ltd., 1986. Vol. 7 URL : https://books.google.com.ua/books?id=nyBjDAAAQBAJ&pg=PA47&lpg=PA47&dq=OneSpark+spectrometer&source=bl&ots=huKxV7lRD3&sig=vLQW2FQca9ZxdmUCIkuTQ2KRZWA&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwj8iqb5s_WAhWjd5oKHUNwBn04ChDoAQgxMAI#v=onepage&q=OneSpark%20spectrometer&f=false (Дата звернення: 29.09.2017)
51. Nakajima T. Kawaguchi H., Kinbara S. Electronically controlled ignitor for spectrographic light source // Spectrochimica Acta. 1962. Vol. 18, Iss. 2. P. 201.
52. Bardócz Á. Investigations concerning light sources for spectrum analysis // Spectrochimica Acta. 1960. Vol. 5, Iss. 5, P. 397.
53. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. Н. Прохоров. Москва, 1983. 928 с.
54. Техническое описание. «Установка фотоэлектрическая вакуумная ДФС-41. Источник возбуждения спектра ИВС-1». Ленинград, 1972. 240 с.
55. Буравлев Ю. М., Рудневский Н. К., Грикит И. А. Спектральный анализ металлов и сплавов (процессы на электродах). Киев, 1976. 190 с.
56. Краткое описание тиристорного генератора импульсов от эмиссионного спектрометра POLYVAC E2000 URL : <http://valvolodin.narod.ru/raznoe/spektrometr.pdf> (Дата звернення: 29.09.2017)
57. Техническое описание спектрометра Spectro Lab. /Spectro Analytical Instruments GmbH. 1984. 524 с.
58. Генераторы. Prima M. Prima A ADC. Prima S. URL : <http://prima-ivs.ru/content/blogcategory/20/40/> (Дата звернення 17.10.2017)
59. «ВМК — оптоэлектроника». Каталог продукции. URL : <http://www.vmk.ru/product.html> (Дата звернення 17.10.2017)
60. Spectro Stationary Metal Analyzers. URL : <http://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy> (Дата звернення 17.10.2017)

61. Optical Emission Spectroscopy (OES) for metal analysis. URL : <http://www.oxford-instruments.com/products/spectrometers/optical-emission-spectroscopy/> (Дата звернення 17.10.2017)
62. BELEC Products Optical Emission Spectrometers. URL : <http://www.belec.de/en/products/> (Дата звернення 17.10.2017)
63. Bruker Optical Emission Spectrometers. URL : <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry.html> (Дата звернення 17.10.2017)
64. Горский Е. В. Построение малогабаритной аппаратуры для анализа металлических сплавов на основе эмиссионного спектрального анализа: дис. кандидата тех. наук : 01.04.01. «Приборы и методы экспериментальной физики». Москва, 2007. 113 с.
65. OBLF Technology GDS Spark Generator. URL : <http://oblf.de/en/technology/oblf-technology/gds-spark-generator/> (Дата звернення 17.10.2017)
66. Кеттенис М. Цифровой генератор – новый тип источника возбуждения в оптической эмиссионной спектрометрии // Аналитика и контроль. 2003, Т. 7, № 2. С. 172–175.
67. Источник возбуждения спектра для эмиссионного спектрального анализа SPARK-500 URL : <http://okb-spectr.ru/products/es/spark500/> (Дата звернення 17.10.2017)
68. ООО «ВМК-Оптоэлектроника» Каталог продукции URL : <http://www.vmk.ru/product.html> (Дата звернення 17.10.2017)
69. Гаранин В. Г. Программируемый генератор для возбуждения спектров «Шаровая молния» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Спец.вып. Т. 73. С. 29–34.
70. Боровиков В. М., Петроченко Д. В., Пищенко С. М., Путьмаков А. Н., Селюнин Д. О. Универсальный источник возбуждения спектров для атомно-эмиссионного спектрального анализа «Везувий-2» // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, № 2. С. 125–128.

71. US Patent US5285251A. Apparatus and methods for optical emission spectroscopy. Pilloud F., Vogel W.; Fisons Ltd. USA. H03K4/02. 29.04.1989.
72. Patent DE102015002104A1. Energy efficient and inherently safe excitation generator. Heinz-Gerd J., Görtz B., Kalenberg J.; Spectro Analytical Instruments GmbH and Co. KG. Germany. 23.02.2015.
73. Ивлев С. И. Атомно-эмиссионный спектральный анализ. Томск, 2014. 26 с.
74. Зайдель А. Н. и др. Таблицы спектральных линий 3-е изд., испр. и доп. Москва, 1969. 782 с.
75. Скоков И. В. Оптические спектральные приборы. Москва, 1984. 240 с.
76. Фриш С. Э. Техника спектроскопии. Ленинград, 1936. 189 с.
77. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. Москва, 1979. 480 с.
78. Максutow Д. Д. Астрономическая оптика. Ленинград, 1979. 395 с.
79. Спектральные приборы. Выбор спектрального прибора. URL : <http://solinstruments.com/ru/articles/spectroscopy/120-catalog/%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F/346-spektralnye-pribory>
(Дата звернення 17.10.2017)
80. Palmer C. Diffraction grating handbook. / E. Loewen ed. of first edition; Fifth edition. New York, 2002. 196 p.
81. Harrison Ken M. Astronomical spectroscopy for amateurs. / Springer Science+Business Media, LLC. 2011. 241 p. DOI 10.1007/978-1-4419-7239-2
82. Справочник конструктора оптико-механических приборов / под ред. М. Я. Кругера, В. А. Панова. Ленинград, 1968. 760 с.
83. Батуrowa Г. С., Кипрова Л. А., Спектры пламен. / под ред. И. А. Абдуллина. Казань, 2014. 207 с.
84. Прокофьев В. К., Нагибина И. М. Спектральные приборы и техника спектроскопии. Ленинград, 1968. 325 с.

85. Спектрограф кварцевый ИСП-30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ленинград, 1963. 35 с.
86. Заглубский А. А., Цыганенко Н. М., Чернова А. П. Спектральные приборы. Санкт-Петербург, 2007. 76 с.
87. Павлычева Н. К. Оптические схемы дифракционных спектральных приборов: новые технологии – новые возможности // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, №3. С. 299–304.
88. Зарубин И. А. Малогабаритные многоканальные оптические спектрометры на основе схемы Черни-Тернера.: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук : спец. 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Новосибирск, 2011. 20 с.
89. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Ленинград, 1975. 312 с.
90. Landsman W. Scattered Light in the STIS Echelle Modes // 1997 HST Calibration Workshop Space Telescope Science Institute 1997. P. 132–137.
91. FU X., DUAN F.-J., LI Y. Design and Implementation of a Compact Echelle Spectrometer // International Conference on Electronic, Control, Automation and Mechanical Engineering : 2017. P. 98–102.
92. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигналов на приборах с зарядовой связью. Москва, 1981. 136 с.
93. Boyle W. S., Smith G. E. Charge semiconductor devices. // Bell System Telecom J., 1970. v.49, Iss. 1, P. 587–593.
94. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы. // Специальная техника. 1999. № 4. URL: http://www.vrsystems.ru/stati/pribori_s_zaryadovoi_svyazyu_ustroistvo_i_osnovnye_principi_raboti.htm (Дата звернения 03.03.2019).
95. Dawiec A. Development of an ultra-fast X-ray camera using hybrid pixel detectors. URL :

https://www.researchgate.net/profile/Arkadiusz_Dawiec/publication/281658941

(Дата звернення 03.03.2019).

96. Приборы с зарядовой связью / под ред. Хоувза М., Моргана Д.: Пер. с англ. Москва, 1981. 376 с.

97. Janesick J R. Scientific Charge-coupled Devices / SPIE Press. 2001. Vol. 83. 920 p.

98. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Москва, 1991. 264 с.

99. Image sensors. Selection guide. June 2019
Hamamatsu Photonics K.K. URL :

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/image_sensor_kmpd0002e.pdf

(Дата звернення 03.09.2019).

100. CCD Saturation and Blooming. Hamamatsu Learning Center. URL :.
<http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Дата

звернення 03.09.2019).

101. Mueller H. Effects of Anti-Blooming in Scientific CCD Cameras. Technical Note 60802. URL :

<http://www.senovation.com/bausteine.net/file/showfile.aspx?downaid=8572&sp=E&domid=703&fd=0> (Дата звернення 03.09.2019).

102. Electron Multiplying Charge-Coupled Devices (EMCCDs)
Hamamatsu Learning Center. URL :

<http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Дата звернення 03.09.2019).

103. EMCCD Tutorial. Nüvü Camēras. URL :
<http://www.nuvucameras.com/emccd-tutorial/> (Дата звернення 03.09.2019).

104. Denvir D., Conroy E. Electron multiplying CCDs. // Proceedings of SPIE :· March 2003. P.55–58.

105. Dynamic Range - Hamamatsu Learning Center. URL :
<http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Дата звернення 03.09.2019).

106. Donati S. Photodetectors: Devices, Circuits and Applications. / Pearson Education. 1999. 432 P.
107. Barnes E. Integrated Solutions for CCD Signal Processing. // Analog Dialogue. 1998. Iss. 32-1 P. 6–8
108. Stefanov K. D., Murray N. J. Optimal digital correlated double sampling for CCD signals. // Electronics Letters. 2014. Iss. 50(14). P. 1022–1024. doi: 10.1049/el.2014.0759
109. Carbone J., et al. Application of low-noise CID imagers in scientific instrumentation cameras. Proc. SPIE 1447, Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors II : 1 July 1991. <https://doi.org/10.1117/12.45327>
110. Eid E. Peramplifier-per pixel Charge injection Device Image Sensors. // Proc SPIE : 1995. Vol. 2415. P. 292–302. DOI: 10.1117/12.206526
111. Carbone J. Megarad and Scientific CIDs. // IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology : 31.01.1996
112. The Thermo Scientific iCAP 7000 Plus Series ICP-OES Unique Charge Injection Device (CID) Detector. URL : <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Technical-Notes/tn-43335-icp-oes-cid-detector-tn43335-en.pdf> (Дата звернення 03.09.2019).
113. Performance Based CID Imaging–Past, Present and Future // Proceedings of SPIE : August 2008, Vol. 7055. DOI: 10.1117/12.795235
114. Dyck R., Weckler G. Integrated arrays of silicon photodetectors for image sensing // IEEE Trans. Electron Devices. 1968. Vol. 15, Iss. 4, P. 196–201. DOI: 10.1109/T-ED.1968.16166
115. Chamberlain S. G. Photosensitivity and Scanning of Silicon Image Detector Arrays // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1969. Vol. 4, Iss. 6. P. 333–342. DOI: 10.1109/JSSC.1969.1050032
116. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле. / под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина. Москва, 2006. 300 с.

117. Манцветов А. А., Цыцулин А. К. Телекамеры на КМОП-фотоприемниках // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2006. № 2. С. 70–89.
118. Litwiller D. CCD vs CMOS: facts and fictions // Photonics spectra. 2001. Iss. 1. P. 18–21.
119. Janesick J. Dueling detectors. CCD or CMOS // SPIE`s OE Magazine 2002. Iss. 2. P. 30 – 33.
120. Розвиток методів та засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та штучного походження. Звіт про НДР (шифр «Омега-3»). Держ. реєстрація № ГР 0117U004035; ІРЕ НАНУ, Харків, 2017. Т. 1. 150 с.
121. STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE Data Sheet. – DS5792: Rev 13, STMicroelectronics. July 2018. 143 p.
122. IR1150S Data Sheet. International Rectifier Corp., 2005. 16 p.
123. Brown R. PFC Converter design with IR1150 One Cycle Control IC Application Note AN1077. International Rectifier Corp. 18 p.
124. Плюснин М. С самым большим набором функций: Новые корректоры коэффициента мощности. // Новости Электроники. 2011. № 10. С. 29–32.
125. MJE15032 (NPN), MJE15033 (PNP) Complementary silicon plastic power transistors. Datasheet. ON Semiconductor. URL : <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJE15032-D.PDF> (Дата звернення 03.12.2019).
126. 2N6040, 2N6042 (PNP), 2N6043, 2N6045 (NPN) Plastic medium-power complementary silicon transistors. Datasheet. ON Semiconductor. URL : <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/2N6040-D.PDF> (Дата звернення 03.12.2019).
127. IRF9540, SiHF9540 Power MOSFET. Datasheet. Vishay Siliconix. URL : <http://www.vishay.com/docs/91078/91078.pdf> (Дата звернення 03.12.2019).

128. MMBT5401 PNP Epitaxial Silicon Transistor. . ON Semiconductor.
URL : <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MMBT5401-D.PDF> (Дата
звернення 03.12.2019).
129. Micro-Cap v.12. Spectrum Software. URL : <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm> (Дата звернення 03.12.2019).
130. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ.
Издание 2–е. Москва. 2015. 704 с.
131. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. / 12 е изд.
Пер. с нем. Москва, 2008. Т. 1. 832 с.
132. Бас А.А. Источники вторичного электропитания с
бестрансформаторным входом Москва. 1987. 160 с.
133. Attiny13A. 8–bit Microcontroller with 1K Bytes In-System
Programmable Flash. Data Sheet. Atmel Corp. 176 p.
134. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва, 1969. 576 с.
135. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Москва, 1985. 272с.
136. Розробка та створення експериментального зразку
малогабаритного фотоелектричного квантометра. Підсумковий звіт. УНТЦ,
Проект №143, 1999. 78 с.
137. Спектрогелиограф для оперативной регистрации активности
Солнца (СОРАС) в различных линиях спектра. Итоговый отчет. УНТЦ,
Проект Uzb-54(J), 2007. 123 с.
138. Акимов Л. А., Белянкин И. П., Егоров А. Д., Егоров В. А.
Спектрогелиограф для современной службы Солнца. // Актуальные
проблемы физики солнечной и звездной активности : 2–7 июня 2003г.,
Н. Новгород. Т 1. С. 230–234.
139. Егоров В.А. Особенности использования матричных сенсоров с
активными пикселями при спектрогелиографических наблюдениях // Солнце
активное и переменное : международная конференция. 2–8 сентября 2007,
КРАО. Крым. URL: <https://jn.craocrimea.ru/index.php/izvcrao/article/view/721>
140. Тарасов К. И. Спектральные приборы. Ленинград, 1968. 388 с.

141. Zemax Optics software. URL : <http://zemax.com> (Дата звернення 03.03.2019).

142. Вендеревская И. Г. Оптический блок малогабаритного спектроанализатора для контроля конструкционных сталей. автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Казань, 2003. 14 с.

143. Соколова Е. А. Дифракционные решетки нового поколения. Их теория, изготовление и применение в спектральных приборах. автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Санкт-Петербург, 2000. 31 с.

144. Леванловская Л. Е. Оптические схемы приборов с вогнутыми голограммными дифракционными решетками, записываемыми во встречных пучках. автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.11.07. Ст. Петербург, 1992. 17 с.

145. Марков С. Н. Оптические схемы спектральных приборов с неклассическими дифракционными решетками и многоэлементными приемниками оптического излучения. автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Москва, 2009. 23 с.

146. Бажанов Ю. В. Фокусирующие дифракционные решетки и их абберрационные свойства. Приборы на их основе. автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук : 01.04.05 «Оптика». Казань, 2004. 34 с.

147. Белокопытов А. А. Методика расчета и технология изготовления вогнутых голограммных дифракционных решеток, записанных негомоцентрическими пучками. автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Казань, 2010. 19 с.

148. Захарова Н. В. Вогнутые голограммные дифракционные решетки, записанные в астигматических пучках. автореф. дис. на соискание ученой

степени кандидата тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Москва, 2010. 24 с.

149. Хасан М. Оптические схемы малогабаритных спектрографов на основе вогнутых отражательных голограммных дифракционных решеток для исследования наноматериалов. автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Казань, 2012. 22 с.

150. Andor's Mechelle ME5000 spectrograph. URL : <https://andor.oxinst.com/products/mechelle-spectrograph/> (Дата звернения 03.03.2019).

151. TC241 780x488 pixel CCD image sensor. Data Sheet. Texas Instruments Inc. 18 p.

152. Harrison Ken. Imaging Sunlight Using a Digital Spectroheliograph. (The Patrick Moore Practical Astronomy Series) / 1st Edition. Springer: 2016. 296 p.

153. Лабузов В. А., Попов В. И., Бехтерев А. В., Пустьмаков А. Н., Пак А. С. Многоэлементные твердотельные детекторы излучения большого размера для атомно-эмиссионного спектрального анализа // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, № 2, С. 104–109.

154. Лабузов В. А., Попов В. И., Пустьмаков А. Н., Бехтерев А. В., Селюнин Д. О. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, № 2. С. 110–115.

155. Лабузов В. А. Многоканальные анализаторы оптических изображений для атомно-эмиссионного спектрального анализа: Автореф. дис. кандидата тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Новосибирск. 2005. 21 с.

156. Шелпакова И. Р., Гаранин В. Г., Чанышева Т. А. Аналитические возможности многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС) в спектральном анализе // Аналитика и контроль. 1998. № 1(3). С. 36.

157. van Veen E.H., Bosch S. Quantitative survey analysis by using the full inductively coupled plasma emission spectra taken from a segmented charge coupled device detector: feasibility study // Spectrochim. Acta. 1997. Part B, 52. P. 323.
158. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Москва, 1961. 171 с.
159. Фриден Б. и др. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Под ред. Хуанга Т. Москва, 1979. 199 с.
160. Линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда типов А1122А-Г1. Техническое описание. 8 с.
161. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. / Москва. 2012. 640 с.
162. Оптические измерения с помощью одномерного ПЗС-детектора // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 1. С. 85–88.
163. ILX526A 3000–pixel CCD Linear Image Sensor (B/W). Data Sheet. E97803–PS. SONY. 13 p.
164. ILX511 2048–pixel CCD Linear Image Sensor (B/W). Data Sheet. - E94108–TE. SONY. 10 p.
165. C-MOS Linear Image Sensor S5461, S5462, S5463, S5464 Series. Data Sheet. Hmamatsu Photonics. 16 p.
166. TCD1205D Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet. TOSHIBA 14 p.
167. TCD1304DG Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet. TOSHIBA 15 p.
168. NOIL1SM4000A. LUPA4000: 4 MegaPixel Hihg Speed CMOS Image Sensor. Data Sheet. ON Semiconductor. 49 p.
169. K1830BE31, KM1830BE31, KP1830BE31, ЭКР1830BE31. (описание). URL : <http://eandc.ru/pdf/mikroskhema/k1830ve31.pdf> (Дата звернения 07.03.2019).

170. AT90S8515 8-Bit AVR Microcontroller with 8K in-system programmable flash. Data Sheet. ATMEL. 112 p.
171. INTEL FPGAs and programmable devices. URL : <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable.html> (Дата звернення 07.03.2019).
172. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике / Изд. 4–е. Москва, 2017. 200 с.
173. Hamamatsu CCD/NMOS/CMOS Image Sensors. Product lineup. URL : <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/image-sensor/ccd-cmos-nmos-image-sensor/index.html> (Дата звернення 07.03.2019).
174. ILX554A 2048–pixel CCD Linear Image Sensor (B/W) for single power supply 5V bar-code reader. Data Sheet. E00818–PS. SONY. 13 p.
175. Моргун О. Н., Немченко К. Э., Рогов Ю. В. Исследования необходимости охлаждения приборов с зарядовой связью в системах визуализации рентгеновского изображения. URL : <http://kvant.ua/ru/articles/19.html> (Дата звернення 17.02.2019).
176. Кларк Э. Р. Эберхардт К. Н. Микроскопические методы исследования материалов / Москва. 2007. 375 с.
177. Березин В. Б. Разработка методов повышения помехоустойчивости астрономических телевизионных камер на приборах с зарядовой связью автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Санкт-Петербург, 2006. 16 с.
178. Budget Astrophotography: Imaging with Your DSLR or Webcam (The Patrick Moore Practical Astronomy Series) Springer. 2015. 264 p. DOI 10.1007/978-1-4939-1773-0
179. Ухов А. А. Оптические спектрометры с многоканальными фотоприемниками. автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Санкт-Петербург, 2015. 32 с.

180. Alexander S. J. Phosphor Coated UV-Responsive CCD Image Sensors / Waterloo, Ontario: University of Waterloo, 2002. URL : <http://hdl.handle.net/10012/921> (Дата звернення 05.08.2018).
181. Ocean Optics website. URL : <https://oceanoptics.com/> (Дата звернення 05.08.2018).
182. Spectro Arcos ICP-OES analyzers. URL : https://www.spectro.com/-/media/ametekspectro/documents/brochure/spectro_arcos_brochure_0218_en.pdf (Дата звернення 03.03.2019).
183. Картер Дж. Spectro Ciros CCD Новое слово в методике оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2003. Т. 7, № 2. С 112–119.
184. Лабусов В. А. и др. Многоэлементные твердотельные детекторы излучения большого размера для атомно-эмиссионного спектрального анализа // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9, № 2. С. 104–109.
185. Лабусов В. А. Многоканальные анализаторы оптических изображений для атомно-эмиссионного спектрального анализа автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Новосибирск, 2005. 19 с.
186. Compare CCD vs CIS scanner technologies. URL : <https://www.tavco.net/wide-format-plotter-scanner-blog/bid/107329/compare-ccd-vs-cis-scanner-technologies> (Дата звернення 03.03.2019).
187. Сафронова Н., Гришанцева Е., Силькис Э. Применение многоканального анализатора эмиссионного спектра ООО «Морс» при эколого-геохимических исследованиях // Аналитика. 2013. № 4. С. 24–31.
188. ООО «Морс». URL : <http://www.ooo-mors.ru/> (Дата звернення 05.08.2018).
189. Centred Sphere Spectrometer. Pat. US6023330, USA. Marshall K. A. . Leco Co.; Feb. 8, 2000.
190. FT232H – Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC. URL : <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (Дата звернення 03.03.2019).

191. Cyclone III FPGAs. URL :
<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (Дата звернення 03.03.2019).
192. Пупышев А. А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. Москва, 2009. 784 с.
193. Высогорец М. В., Митрофанова Н. Н., Ненашев А. В., Серов Р. В. Оптические измерения с помощью одномерного ПЗС детектора // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 1. С. 85–88.
194. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.
195. Fellers T. J. Concepts in Digital Imaging Technology CCD Saturation and Blooming // National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University. URL :
<http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html>
196. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer // Opto-Electronic Engineering Journal, 2017, Vol. 44, Iss. 11. P. 1101–1106. DOI: 10.3969/j.issn.1003–501X.2017.11.010
197. Ухов А. А. Оптические спектрометры с многоэлементными приемниками. автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук : 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Санкт-Петербург, 2015. 32 с.
198. Гороховский Ю. Н., Левенберг Т. М. Общая сенситометрия. Теория и практика. Москва. 1963. 302 с.
199. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. / Физическая лаборатория. Ч1. Одесса, 2002. 54 с.
200. Куликов Е. И. Вопросы оценок параметров сигналов при наличии помех. Москва, 1969. 224 с.

201. Васильева И. Е. и др. Градуировка методик атомно-эмиссионного анализа с компьютерной обработкой спектров. // Журнал аналитической химии. 1997. Т. 52, № 12. С. 1238–1248.
202. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных. Москва, 2008. 208 с.
203. Худсон Д. Статистика для физиков. Москва: Мир, 1970. 297 с.
204. Chein-I Chang, Hsuan Ren, Chein-Chi Chang, Francis D'Amico, James O. Jensen Estimation of Subpixel Target Size for Remotely Sensed Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, Iss. 6. June 2004. P. 1309 – 1320. DOI: 10.1109/TGRS.2004.826559

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Егоров А. Д., Моторненко А. П., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В., Корж В. Г., Скуратовский И. Г. Автоматизированный спектрометр для эмиссионного спектрального анализа // Радиофизика и электроника. 1999. Т. 4, № 3. С. 148–153. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, участь у дослідженнях спектральних характеристик ПЗЗ ILX526A (Sony)).*
2. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Здор Е. В. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками // Радиофизика и электроника. 2002. Т. 7, № 2. С. 422–425. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної багатоканальної камери на базі КМОН сенсора S5463–1024Q (Hamamatsu), участь у розробці методики вимірювань).*
3. Yegorov A., Yegorov V., Yegorov S. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 1. С. 77–83. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру на базі ПЗЗ сенсора TCD1205D (Toshiba), запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача, приймав участь у визначенні методики вимірювань, та попередньої обробки даних).*
4. Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельников І. Є. Дослідження можливості компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2019. № 5–6. С. 8–15. *(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив декілька модифікацій спектральних камер, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗЗ сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній)*

5. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Экспериментальное исследование газоразрядной антенны на парах ртути с низкочастотным возбуждением плазмы // Прикладна радіоелектроніка. 2019. Т. 18, № 3–4. С. 190–196. *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях)*

6. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников І. Є. Дуговий генератор плазми атомно-емісійного аналізатора з цифровим керуванням параметрами розряду // Радіофізика та електроніка. 2020. Т. 25, № 3. С. 78–88. DOI: doi.org /10.15407/rej2020.03.078 *(Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію генератора плазми, виконав моделювання і макетування джерел розрядного струму.)*

Наукова праця у зарубіжному спеціалізованому виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз :

7. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников спектра атомно-эмиссионных анализаторов. // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 3. С. 410–416. (Scopus, WoS)

(Особистий внесок здобувача: розробив та виготовив багатосенсорну спектральну камеру, запропонував використання зустрічного транспортування зарядів в ПЗС сенсорах для відновлення координат перевантажених спектральних ліній, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗС)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на наукових конференціях):

8. Акимов Л. А., Егоров А. Д., Егоров В. А. Проект спектрогелиографа // Солнце и космическая погода: конференция памяти академика Андрея Борисовича Северного, 9–14 июня. 2003 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2004. Т. 100, № 1. С. 233. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, виконав аналіз параметрів фотодетекторів)*

9. Акимов Л. А., Белянкин И. П., Егоров А. Д., Егоров В. А. Еленская Л. И., Здор Е. В., Железняк А. П., Коничек В. В., Корохин В. В., Синельников И. Е. Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці оптичної схеми інструмента, розробляв і досліджував спектральну камеру на матричному КМОН фотоприймачі).*

10. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Получение субпиксельного разрешения при регистрации изображений спектров фотодиодными структурами // Физика звездных атмосфер: химический состав, магнетизм и поверхностные неоднородности : материалы международной научной конференции, 17–23 июня. 2007 г. : тезисы докл. Крым, Известия крымской астрофизической обсерватории. 2008. Т. 104, № 2. С. 51. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру, запропонував рішення щодо модифікації спектрометрів для забезпечення зсуву спектру відносно фотоприймача).*

11. Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // Функциональные и конструкционные материалы : материалы 3–й международной научно-технической конференции НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ, 11–14 ноября 2013 г., Донецк, 2013. С. 85. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методику визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, розробив методику вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням).*

12. Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Реконструкция спектров излучения при заданных ограничениях на аппаратную функцию

системы регистрации // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов радиолокации, связи и акустике : VIII Всероссийские Арmandовские чтения, 26–28 июня 2018 г., Муром. С. 7–9. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2018/tezis-2018/pdf/T_1.pdf (*Особистий внесок здобувача: брав участь у формулюванні завдань дослідження з урахуванням специфіки вимірювань ПЗЗ сенсорами*)

13. Егоров А. Д., Егоров С. А., Егоров В. А., Синельников И. Е. Влияние температуры на чувствительность CCD сенсоров фирмы Toshiba TCD1304AP и TCD1304DG. // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 625–629. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_38.pdf (*Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні експериментальної установки та інтерпретації результатів вимірювань*).

14. Егоров С. А., Егоров В. А. Исследование нелинейности чувствительности ПЗС сенсоров TCD1304 и влияющих на нее факторов // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 635–638. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_40.pdf (*Особистий внесок здобувача: запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ*).

15. Егоров В. А., Егоров С. А., Луценко В. И. Плазменная антенна с парами ртути вида полувибратора Пистолькорса на металлическом экране // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн : Всероссийские Арmandовские чтения, 28–30 мая 2019 г., Муром. С. 580–587. URL : http://www.mivlgu.ru/conf/armand2019/sbornik-2019/pdf/S4_31.pdf (*Особистий внесок здобувача: запропонував і виготовив конструкцію плазмової антени з низькочастотним збудженням плазми, брав участь у вимірюваннях*)

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації:***

16. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Корж В. Г., Моторненко А. П. Автоматизированный спектрометр на основе спектрографа ИСП-28 // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2000. Вып. 18. С. 235–241. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення односенсорної ПЗЗ камери, брав участь у дослідження спектральних характеристик фотодетекторів)*

17. Егоров В. А., Егоров С. А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр // *Наука та інновації*. 2008. Т. 4, № 2. С. 33–39. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру з розташуванням сенсорів на колі Роуланда, виконав комп'ютерне моделювання оптичної схеми спектрометра і декількох типів дифракційних ґраток).*

18. Андриющенко А. Ю., Бланк А. Б., Глушкова Л. В., Шевцов Н. И., Штителъман З. В., Егоров А. Д., Егоров В. А., Здор Е. В. О преимуществах фотоэлектрической регистрации атомно-эмиссионных спектров для анализа функциональных материалов и объектов окружающей среды // *Методы и объекты химического анализа*. 2008. Т. 3, № 2. С. 157–162. *(Особистий внесок здобувача: розробив і виготовив спектральну камеру для спектрографа ДФС-8, брав участь в постановці завдань та інтерпретації результатів вимірювань)*

19. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами // *Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць*. 2014. Вип. 48(2). С. 74–80. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методіку визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу,*

розробив методика вимірювань і конструкцію спектральної камери з термоелектричним охолодженням)

20. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е. Телескопы видимого и инфракрасного диапазонов для обнаружения экзопланет земного типа // Радиофизика и радиоастрономия. 2016. Т. 21, № 1. С. 14–23. *(Особистий внесок здобувача: оцінив вплив квантових флуктуацій при вимірюваннях світлового потоку в видимому та інфрачервоному діапазонах з застосуванням режиму підрахунку фотонів фотоприймачами різних типів)*.

21. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е., Бабаков М. Ф. Мультисенсорная камера для спектральных измерений на приборах с зарядовой связью линейной структуры // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2019. Т. 90, № 2. С. 80–88. *(Особистий внесок здобувача: розробка і виготовлення мультисенсорної камери для спектральних вимірювань, запропонував методика визначення температури сенсора по амплітуді періодичної складової вихідного сигналу, запропонував пояснення відхилення закону взаємозамінності для малих рівнів експозицій ПЗЗ)*

22. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Синельников И. Е. Удосконалені методики обробки даних в оптичних спектрометрах // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 3, Ч. 1. С. 46–50. *(Особистий внесок здобувача: запропонував табличне задання апаратної функції при обробці спектрів методом максимальної правдоподібності)*

ДОДАТОК Б

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ХАРКІВСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД
«ПЛІНФА»



Конюшенко Григорій Миколайович

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи

Егорова Вадима Анатолійовича

«Підвищення метрологічних та експлуатаційних елементів та систем атомно-емісійного спектрального аналізу»

Завод ПрАТ «ХМЗ«ПЛІНФА» («Червоний Жовтень») біля десяти років співробітничав з Інститутом радіофізики і електроніки НАН України в галузі вдосконалення апаратури й методів атомно-емісійного спектрального аналізу. Так, згідно з Договором №20/11,2011р. «Розробка системи керування генератором плазми і модернізація електродного вузла спектрографа ИСП-28» (шифр «Жовтень») між ІРЕ і заводом були виконані роботи з участю Егорова В.А. по переведенні систем реєстрації спектрів і управління генератором плазми на сучасну електронну та комп'ютерну базу. Комісія у складі головного інженера Тиморський В.Д., начальника ЦЗЛ Бондаренко І.П., відзначає наступне:

1. Перехід від фотографічної реєстрації спектру до фотоелектричної значно скоротив (в десятки разів) час проведення аналізів.
2. Фотоелектрична реєстрація спектрів зробила можливою повну комп'ютерну обробку даних вимірювань.
3. Комп'ютерна обробка зробила доступною для користування велику кількість більш досконалих аналітичних методик і алгоритмів, що були недоступні раніше.
4. Комп'ютеризація відкрила широкі можливості подальшої автоматизації роботи заводської лабораторії.

Завдяки переліченим особливостям модернізації спектрального аналізу, які більш повно представлені в дисертації Егорова Вадима Анатолійовича, наш завод застосовує розроблену апаратуру і методики для контролю сировини і вихідного контролю готової продукції. Це привело до зменшення часу аналізу, підвищення точності, зменшення витрат на сировину, зменшення кількості стандартних зразків для аналізу.

В подальшому ми плануємо більш широке використання в нашому виробничому процесі розробленого в дисертації Егорова В.А. спектрального реєстратора, генератора плазми і інших елементів та систем атомно-емісійного спектрального аналізу.

Головний інженер
ПрАТ«ХМЗ«ПЛІНФА»

Тиморський В.Д.

Начальник ЦЗЛ
ПрАТ«ХМЗ«ПЛІНФА»

Бондаренко І.П.

ДОДАТОК В

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора Інституту
радіофізики та електроніки ім.

О.Я.Усикова

НАН України



Ю.Ф.Логвінов

09.09 2020 р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший заступник генерального
директора ДНУ НТК

«Інститут монокристалів»

НАН України



В.А.Чебанов

«18» Вересня 2020 р.

АКТ

використання у практиці наукових досліджень системи фотоелектричної
реєстрації спектрів для спектрографа ДФС-8, що розроблена за результатами
дисертаційної роботи Єгоров В.А.

Ми, ті що нижче підписалися, головний науковий співробітник д.ф.м.н. Масалов С.О., старший науковий співробітник к.ф.м.н. Корж В.Г., відділу фізичної інтроскопії ІРЕ НАНУ і працівники Науково-дослідного відділення хімії функціональних матеріалів ДНУ НТК ІМК НАНУ – в.о. завідувача відділу аналітичної хімії ім. А.Б. Бланка, к.х.н. Беліков К.М., молодший науковий співробітник, к.т.н. Андрющенко Г.Ю., склали цей акт в тому, що в 2004 р. в практику роботи відділу аналітичної хімії було впроваджено камеру реєстрації спектрів, яку було розроблено співробітником ІРЕ НАНУ, дисертантом Єгоровим В.А. Він розробив і виготовив систему фотоелектричної реєстрації спектрів для спектрографа ДФС-8 і приймав участь у вивченні порівняльних характеристик фотоелектричної та фотографічної реєстрації. Камера застосовувалась у дослідницькій діяльності відділу аналітичної хімії, і за її результатами було опубліковано статтю у співавторстві співробітників ДНУ НТК ІМК НАНУ та ІРЕ НАНУ:

Андрющенко А.Ю., Бланк А.Б., Глушкова Л.В., Шевцов Н.И., Штительман З.В., Егоров А.Д., Егоров В.А., Здор Е.В. О преимуществах фотоэлектрической регистрации атомно-эмиссионных спектров для анализа функциональных материалов и объектов окружающей среды // Методы и объекты химического анализа, Киев КНУ. 2008, Т. 3, № 2. С. 157-162. URL: <http://www.moca.net.ua/08/pdf/03022008-157.pdf>

Від ІРЕ НАНУ:

С.Масалов

Масалов С.А.

В.Корж

Корж В.Г.

Від ДНУ НТК ІМК НАНУ

К.М.Беліков

Беліков К.М.

Андрющенко Г.Ю.

ДОДАТОК Г

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи В.А.Сгорова «Підвищення метрологічних та експлуатаційних характеристик елементів та систем атомно-емісійного спектрального аналізу».

Комісія у складі головного наукового співробітника д.ф.м.н. Масалова С.О., завідувача лабораторією старшого наукового співробітника д.ф.м.н. Луценка В.І., молодшого наукового співробітника Сінельнікова І.С., відділу фізичної інтроскопії ІРЕ НАНУ, склали цей акт в тому, що В.А.Сгоровим було розроблено декілька комплектів приладів, що складаються з генераторів плазми, оптичних блоків аналізаторів спектра і спектральних реєструючих камер, а також методів їх удосконалення та застосування, на яких базується апаратура атомно-емісійного спектрального аналізу, представлена в дисертації. В тому числі дисертантом було:

Розроблено, спроектовано і виготовлено кілька варіантів спектроскопічних камер які використовуються разом з серійними спектрографами ИСП-30, ИСП-28, ДФС-452, ДФС-8, ИСП-51 і які замінили на цьому обладнанні фотографічну реєстрацію спектрів. Це дозволило значно, з 30 хвилин до 1-2 хвилин, скоротити терміни виконання аналізів, виключити процес обробки фотоматеріалів, комп'ютеризувати процес виконання аналізів. Збільшити точність і експресність виконання робіт.

Розроблено методики визначення температури сенсорів використані в програмному забезпеченні спектрального аналізу, що значно зменшило вплив температури на результати аналізу.

Розроблено і виготовлено дуговий генератор «ЦУГ-2», що дозволило в порівнянні з серійним генератором «УГД-4» скоротити енергоспоживання на 60%, збільшити точність аналізів в середньому у 3 рази, і розширило діапазон вимірюваних концентрацій.

Дослідження, представлені у дисертаційній роботі є достатньо теоретично та експериментально обґрунтованими, а розроблена дисертантом апаратура впроваджена на ряді підприємств і організацій України. Серед них ДП «Завод ім. В.О.Малишева» Укроборонпром (Дог. №11 / 14-1102дн, 2015р.), ПАТ Харківський машинобудівний завод «ПІІНФА» (Дог. №20 / 11, 2011р.), ПАТ Харківський електротехнічний завод «ХЕЛЗ Укрелектромаш» (Дог. №9 / 10, 2010р.), ППФ «БОНА» м. Харків (дог. №02 / 07, 2007р.), де вони використовуються для контролю вхідної сировини, готової продукції, технологічних процесів виробництва, а також у дослідній та навчальній практиці. Результати впровадження підтверджуються актами виконаних робіт ІРЕ НАНУ.

Дана робота виконана у відділі радіофізичної інтроскопії ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України в рамках досліджень, що проводилися при виконанні держбюджетних НДР: "Стриж-4" 2003р., "Стриж-5" 2006р., "Омега" 2007р., "Омега-2" 2012р., «Омега-3» 2017р., "Сенсорика-2" 2018 р..



С.О. Масалов



В.І. Луценко



І.С. Сінельніков