

# **Исследования в области создания лазеров субмм диапазона длин волн и их применение для целей диагностики высокотемпературной плазмы**

*(С. Ф. Дюбко, В. А. Маслов, В. А. Свич, А. Н. Топков)*

## **1. Молекулярные лазеры субмм диапазона длин волн**

### **1.1. Газоразрядные молекулярные лазеры субмм диапазона длин волн**

Проблема генерирования электромагнитных колебаний в диапазоне субмм волн, решение которой определяет прогресс в освоении этого диапазона, оказалась одной из самых трудных проблем радиофизики. Только в 60-е годы удалось создать первые субмм лампы обратной волны (ЛОВ), работающие в длинноволновой части субмм диапазона, а несколько лет спустя — первые газоразрядные лазеры. Однако, потребность в освоении всего субмм диапазона длин волн назрела давно и появление в 60-х годах генераторов нового типа — лазеров вселяло надежду на возможность проведения этих источников излучения в дальнюю инфракрасную область и субмиллиметровый диапазон. Действительно, уже в 1964 году появилось первое сообщение (Гобби, Матиус, Кронер) [1] о запуске молекулярных лазеров на молекулах  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\lambda = 78$  мкм, 118 мкм) и  $\text{HCN}$  ( $\lambda = 337$  мкм, 311 мкм). Лазеры развивали в непрерывном режиме мощность в единицы мВт и давали превосходное когерентное излучение. Появление этих лазеров рассматривалось в свое время как крупное достижение квантовой радиофизики.

Испытания разрабатываемой на кафедре измерительной аппаратуры (волномеры, частотомеры, детекторы излучения) были возможны только в длинноволновой области диапазона вблизи 300 ГГц, где работали имеющиеся в СССР ЛОВ. Это ограничение побудило к созданию источников излучения без коротковолновой границы. Такими источниками представлялись молекулярные газоразрядные лазеры. По собственной инициативе доцент С. Ф. Дюбко и аспирант В. А. Свич в 1967 году воспроизвели опыт американцев и запускают лазеры на молекулах  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$  и  $\text{HCN}$ , причем быстро достигают мощностей генерации на порядок выше опубликованных значений [1, 2, 4].

Поиск новых активных сред, способных обеспечить генерацию новых волн, завершился успехом. Была обнаружена возмож-

ность получения лазерного эффекта в субмм диапазоне ( $\lambda = 141$  мкм и  $\lambda = 190$  мкм) при разряде в парах двуокиси серы —  $\text{SO}_2$ . Так на кафедре в 1968 г. был открыт новый субмм лазер. Его характеристики были тщательно измерены и опубликованы [3]. За цикл работ, посвященных исследованиям субмм лазеров, и в частности, за открытие  $\text{SO}_2$ -лазера С. Ф. Дюбко и В. А. Свич в 1971 г. присуждена Республиканская премия им. Н. Островского за достижения в области науки и техники. Эти же исследования легли в основу кандидатской диссертации В. А. Свича. Обстоятельные исследования газоразрядных HCN-лазеров были выполнены в период 1973–1983 гг. А. Н. Топковым (в соавторстве с С. Ф. Дюбко, В. А. Свич и др.) [5, 6], которые легли в основу его кандидатской диссертации, защищенной в 1985 году.

## **1.2. Молекулярные лазеры субмм диапазона длин волн с оптической накачкой**

Газоразрядные лазеры на молекулах HCN,  $\text{H}_2\text{O}$  и др. в непрерывном режиме способны обеспечить генерацию с приемлемым уровнем мощности (десятки мВт) только на небольшом числе фиксированных волн. Многократно предпринимаемые попытки расширить возможности ЛОВ и газоразрядных лазеров в субмм диапазоне оказались малоуспешными и выход из положения здесь представляется в поиске и реализации новых идей, новых подходов к решению этой проблемы.

Одной из наиболее плодотворных оказалась идея создания молекулярных лазеров на вращательных переходах с прицельной оптической накачкой, высказанная советскими физиками (Н. Г. Басов, В. С. Летохов) и впервые реализованная американцами Т. Чангом и Т. Бриджесом в 1970 г.

В СССР впервые лазеры этого типа были созданы на кафедре радиоизмерений в ХГУ им. А. М. Горького в 1971–1972 гг. и впервые получена генерация на множестве новых активных сред [7–17].

Результаты уже первых экспериментов убедительно свидетельствовали о перспективности нового метода генерирования волн субмм диапазона. Главное достоинство лазеров с оптической накачкой (ЛОН) состоит в том, что они позволяют получить генерацию на множестве длин волн в диапазоне от единиц миллиметров до десятков микрометров, если в качестве источника накачки использован  $\text{CO}_2$ -лазер, допускающий перестройку по многим линиям в диапазоне 9–11 мкм, где имеются сильные полосы поглощения многих молекул на вращательных переходах. Инверсия достигается обычно на вращательных переходах в возбужден-

ных колебательных состояниях. Если молекула имеет дополнительный момент, то на частотах инвертированных вращательных переходов возможно усиление и генерация.

Принцип действия ЛОН вселял надежду на возможность существенного улучшения КПД и уровня генерируемой мощности в непрерывном и в особенности — в импульсном режимах. Отсутствие электрического разряда в газе позволяет создать «отпаянные» приборы.

Реализация потенциальных возможностей нового метода генерирования излучения в диапазоне субмм длин волн потребовала углубленного, комплексного изучения сложных физических процессов, лежащих в основе лазерного эффекта на вращательных переходах многоатомных молекул, возбуждаемых излучением мощного ИК-лазера. Возникла необходимость в проведении целого комплекса физических исследований, связанных с выбором подходящих молекул, детальным изучением их спектров вынужденного излучения, изучением вращательных и вращательно-колебательных спектров поглощения, идентификацией рабочих переходов лазеров, изучением общих закономерностей свойств активной среды, изучением энергетических и частотных характеристик лазеров, выработкой рекомендаций по оптимальному конструированию генераторов, разработкой и созданием действующих образцов приборов.

Решению перечисленных задач и был посвящен цикл работ, проведенных на кафедре квантовой радиофизики в период с 1971 г. по 1990 г. [18–23].

Основные научные результаты этого направления работ сотрудников кафедры сводятся к следующему.

1. Впервые получена генерация субмм волн на 36-ти различных молекулах, возбуждаемых излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Общее число обнаруженных линий генерации в диапазоне длин волн 2600–50 мкм превышает  $10^3$ , что составляет около 50 % от общего числа линий, открытых совместными усилиями исследователей во всем мире к концу 1990 г.

Для каждой линии генерации измерены длина волны, интенсивность и поляризация. Для 320 линий с точностью до  $10^{-6}$  проведены измерения частоты (60 % от общего числа линий с известной частотой).

2. Идентифицированы рабочие переходы лазеров на молекулах  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{HCOOD}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ ,  $\text{CD}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_3\text{B}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{D}$ . Число идентифицированных переходов различных молекул превышает 80, что составляет около 40 % общего числа идентификации переходов ЛОН к концу 1990 г.

3. Впервые в импульсном режиме получена высокоэффективная генерация излучения ЛОН с накачкой ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера на молекуле  $\text{D}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{CHCl}_3$  с общим числом линий генерации на этих молекулах более 150.

4. Продемонстрирована возможность получения эффективной амплитудной модуляции выходного излучения ЛОН с двухфотонной накачкой (ИК + ММ), а также за счет эффекта Штарка.

5. Показана возможность перестройки частоты непрерывного действующего ЛОН в пределах нескольких сотен мегагерц с применением эффекта Штарка, либо гиперрамановского режима генерации ЛОН.

6. С привлечением формализма матрицы плотности решены задачи расчета усиления активной среды ЛОН при возбуждении ее двумя однонаправленными волнами с близкими частотами, показана возможность увеличения эффективности накачки сигналом; теоретически исследованы важные случаи трехволнового взаимодействия, двухквантовой люминесценции и двухфотонной накачки.

7. Теоретически и экспериментально изучен Штарк-эффект в ЛОН.

8. Выявлены (теоретически и экспериментально) основные закономерности свойств активных сред ЛОН, получены аналитические выражения для расчетов усиления среды, выходной мощности, КПД генераторов.

9. Предложен специальный резонатор для ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера для накачки импульсных ЛОН с повышением селекции типов колебаний, обеспечивающий повышение КПД ЛОН.

10. Найдены значения более 50 молекулярных и уточнены значения более 200 молекулярных констант, описывающих субмм вращательный спектр молекул, применяемых в ЛОН. Таков главный итог экспериментального и теоретического исследования вращательных спектров молекул, проведенных в труднодоступной области частот вплоть до 800 ГГц, в основном и возбужденных колебательных состояниях.

11. Впервые проведен высокочастотный (на радиоспектроскопическом уровне точности) анализ вращательно-колебательных инфракрасных спектров молекул  $\text{HCOOH}$  (полосы  $\nu_6$  и  $\nu_8$ ), а также молекул  $\text{CH}_3\text{V}_2^{81}$  (полоса  $\nu_6$ ). Эти исследования выполнены методом «сшивания» предварительно измеренных вращательных спектров в основном и возбужденном состояниях.

12. Созданы первые отечественные образцы многочастотных субмм ЛОН непрерывного действия, как универсальные, так и специализированные.

13. Созданы мощные импульсные лазеры субмм диапазона длин волн с оптической накачкой ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазерами для целей диагностики плазмы.

Ценность проведенного цикла работ заключается в том, что полученные результаты уже широко используются в работах других исследователей, о чем свидетельствует множество (более 100) ссылок на работы авторов в статьях зарубежных ученых. Сведения о спектрах лазерного излучения, впервые предложенных авторами активных сред субмм ЛОН, — один из главных результатов, который имеет первостепенное значение в решении проблем создания источников нового типа в субмм диапазоне длин волн. Авторами изданы таблицы линий генерации ЛОН, где систематизированы данные о более чем 1500 линиях генерации ЛОН, которые являются настольным пособием экспериментаторов, использующих ЛОН, и теоретиков, работающих в данной области.

Результаты исследования вращательных спектров молекул в диапазоне субмм волн представляют интерес не только узкоспециализированный (проблема ЛОН), но и весьма ценны и для дальнейшего прогресса в развитии ДИК и ИК спектроскопии высокого разрешения, для радиоастрономии в целях химического и изотопного анализа, для метрологии и решения экологических проблем.

Экспериментальные и теоретические исследования завершились выработкой рекомендаций по разработке источников излучения непрерывного действия, обладающих высокой монохроматичностью, работающих на более чем 103 линиях в диапазоне длин волн 2600–500 мкм с мощностью генерации на отдельных линиях 0,1–100 мВт. Созданы также образцы мощных импульсных лазеров с выходной мощностью вплоть до 500 кВт и энергией импульса 50 мДж, предназначенных для исследования плазмы методом томсоновского рассеяния.

Потенциальные возможности практического применения субмм ЛОН далеко не исчерпываются уже реализованными. Так, следует еще раз упомянуть о новых возможностях для газовой молекулярной радиоспектроскопии в ранее недоступном диапазоне длин волн, в частности для исследования возбужденных состояний молекул, применяемых в ЛОН (а их более 50), для спектроскопии поглощения в сжатых неполярных газах, в Штарк — спектроскопии, двухфотонной спектроскопии

с применением мощных импульсных ЛОН, в ЛМР — спектроскопии радикалов.

Результаты, полученные в ходе выполнения упомянутого цикла работ, опубликованы и докладывались неоднократно на международных симпозиумах и вошли в известные международные справочники по лазерам дальней инфракрасной области. Они получили международное признание. По результатам этого цикла работ написаны и защищены две докторские диссертации (С. Ф. Дюбко, В. А. Свич) и 6 кандидатских диссертаций (В. Г. Герасимов, В. А. Ефремов, А. Н. Топков, Л. Д. Фесенко, Н. Г. Покормяхо, О. Ф. Манита).

За этот цикл работ главным исполнителем (С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко, М. Н. Ефименко, В. Г. Герасимов, В. А. Ефремов, Н. Г. Покормяхо, А. Н. Топков) в 1994 году присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники.

## **2. Формирование и селекция поперечных мод в лазерах субмиллиметрового диапазона**

К 80-м годам удалось добиться значительного прогресса в разработке и создании лазеров субмм диапазона. Однако основные усилия были сосредоточены на поиске новых активных сред, способных обеспечить генерацию электромагнитных колебаний во всем субмиллиметровом диапазоне, и их идентификацию. Для создания резонансных систем субмм лазеров широкое применение получили открытые и волноводные резонаторы. Благодаря известным трудам зарубежных ученых А. Фокса и Т. Ли, Дж. Бойда и Дж. Гордона, Г. Когельника, А. Сигмена и советских исследователей А. Ф. Сучкова, Л. А. Вайнштейна, В. И. Таланова, Ю. А. Ананьева, В. П. Быкова электродинамические свойства открытых резонаторов были изучены достаточно полно. Однако большинство применяемых и в настоящее время субмм лазеров снабжено не резонаторами Фабри—Перо, а полыми волноводными резонаторами больших размеров ( $\gg \lambda$ ). Уже в 1973 году, т. е. спустя три года после публикации первой работы Т. Чжана и Т. Бриджеса по субмм лазерам с оптической накачкой появилась статья Д. Ходжеса и Т. Хартвика, в которой волноводные методы, применявшиеся ранее в лазерах других спектральных диапазонов, были применены к ЛОН, что послужило стимулом для развития техники этих лазеров.

Волноводные резонаторы представляют резонансные системы, состоящие из полой диэлектрической или металлической трубок и зеркал, расположенных вплотную к трубкам (внутренние зеркала) или на не-

котором расстоянии от них (внешние зеркала). Сравнительно полно, до уровня конкретных практических рекомендаций к 80-м годам были изучены открытые и волноводные резонаторы с внешними равномерно отражающими зеркалами. Волноводные резонаторы субмм лазеров используют внутренние зеркала, при наличии различных крупномасштабных неоднородностей (кривизна, перекося, отверствия связи) в которых, высшие волноводные моды могут оказывать сильное влияние на характеристики выходного излучения. В связи с возрастающим применением при создании субмм лазеров волноводных резонаторов с различными неоднородностями в зеркалах (а именно такие резонаторы обеспечили достижение рекордных значений по мощности среди субмм лазеров в настоящее время) актуальной как в научном плане, так и при практическом применении стала задача адекватного расчета и проведение экспериментальных исследований электродинамических характеристик таких резонансных систем с целью их последующей оптимизации. Актуальность данной задачи также была обусловлена необходимостью изучения влияния различных вакуумирующих оболочек, цилиндрических экранов, широко применяющихся в приборах СВЧ и КВЧ, на спектральные характеристики открытых резонаторов, которые в этом случае переходят в волноводный режим и нуждаются в адекватных теоретических и экспериментальных методах изучения их характеристик.

Обстоятельные исследования волноводных резонаторов были выполнены в период 1980–1990 гг. В. А. Масловым (в соавторстве с В. А. Епишиным, В. А. Свичом, А. Н. Топковым и др.) [24], которые легли в основу его кандидатской диссертации, защищенной в 1988 году. В результате этих исследований был развит метод, проведены расчеты характеристик диэлектрических волноводных резонаторов субмиллиметровых лазеров с зеркалами на торцах, содержащими различные фазовые аберрации.

При проектировании волноводных лазеров выбор между диэлектрическими и металлическими волноводами определяется несколькими соображениями. Основное достоинство диэлектрического волновода — возможность получения пучка излучения с линейной поляризацией в режиме, близком к дифракционному. Главная проблема в случае таких волноводов связана с тем, что на длинных волнах они вносят значительные потери, поэтому для сохранения допустимого уровня потерь на распространение требуются волноводы большого диаметра. Преимущества, которые дает малый диаметр трубок, можно сохранить на длинных волнах за счет применения металлических круглых волноводов, обладающих сравнительно

малыми потерями. Поэтому обширные экспериментальные исследования субмиллиметровых лазеров с резонатором на основе круглого металлического волновода были проведены на кафедре в период 1990—2000 гг. В. М. Ткаченко в соавторстве со В. А. Свичом и А. Н. Топковым [25], которые легли в основу его кандидатской диссертации, защищенной в 1998 году.

В начале 2000 года актуальной стала задача создания широкодиапазонного малогабаритного субмм ЛОН с модовым селектором. Для этого было необходимо рассмотреть вопросы формирования лазерных мод с учетом их взаимодействия на отверстиях связи, методы селекции низших и высших поперечных мод, условия распространения излучения накачки в субмм кювете. Для лазеров, которые перестраиваются в широком диапазоне длин волн, были необходимы методы, которые позволяют технически просто осуществлять селекцию мод при перестройке резонатора. Такие исследования методов селекции поперечных мод квазиоптических металловолноводных резонаторов субмм ЛОН были проведены на кафедре в период 2000—2007 гг. А. В. Дегтяревым в соавторстве со В. А. Свичом, А. Н. Топковым и В. А. Масловым [26], которые легли в основу его кандидатской диссертации, защищенной в 2007 году.

Активное развитие в квантовой радиофизике с 90-х годов прошлого века получила проблема формирования лазерных пучков с заданным профилем выходного излучения («laser beam shaping»). Если ранее с момента создания лазера в центре внимания ученых и разработчиков были процессы, протекающие в самих квантовых генераторах, то сейчас наряду с продолжающимся прогрессом в развитии собственно лазеров, например коротковолновых, все больший интерес и актуальность приобретают исследования и разработки, связанные с доставкой лазерного излучения к объекту с требуемым качеством пучка (размер и форма пятна, равномерность облучения и т. п.).

В настоящее время для формирования заданного поля в открытых лазерных резонаторах применяются асферические зеркала. Подобные волноводные резонаторы недавно предложены для получения однородных азимутально симметричных выходных пучков газовых и твердотельных лазеров. Однако их отличает необходимость введения дополнительных фокусирующих элементов в резонатор, что приводит к усложнению конструкции. Представляет интерес поиск более простых и энергетически более эффективных методов формирования выходного пучка заданного профиля в волноводных квазиоптических резонаторах. Этим исследованиям была посвящена выполненная на кафедре аспиран-

том А. В. Володенко кандидатская диссертация, защищенная им в 2007 году [27].

Результаты исследований по разработке и реализации новых эффективных методов формирования и селекции поперечных мод в лазерных резонаторах, предназначенных для создания одномодовых квантовых генераторов ИК и субмм диапазонов с заданным профилем выходного излучения, обобщены в докторской диссертации В. А. Маслова, защищенной в 2008 году [28]. Практическая значимость полученных результатов обусловлена их использованием в качестве основы для построения нового перспективного направления в квантовой радиофизике, состоящего в создании лазерных систем с управляемыми характеристиками для научных и прикладных исследований.

Как известно, в лазерной физике изображение, или модуляция интенсивности, — лишь одна из возможных форм кодирования информации. Поляризация в каждой точке двумерного когерентного светового поля представляет невидимое для глаза, но информативное «изображение». Новым направлением лазерной физики, получившим бурное развитие в последнее время, является создание лазерных пучков с различной пространственной поляризацией излучения. Поэтому представляется весьма актуальным изучить возможности применения поляризационно-селективных зеркал в волноводных квазиоптических резонаторах и вне-резонаторных устройствах для получения высококачественных лазерных пучков с пространственно различной поляризацией излучения. Эти исследования начинают развиваться на кафедре квантовой радиофизики совместно с исследовательскими группами А. В. Кудряшова (МГУ), В. Г. Низьева (ИПЛИТ РАН), В. Г. Волостникова (Самарский филиал ФИ РАН), А. Ф. Гловы и Н. Н. Елкина (ТРИНИТИ ГНЦ РФ).

### **3. Применение лазеров субмм диапазона для целей диагностики высокотемпературной плазмы**

С созданием субмм лазеров стало возможным проведение интерферометрических измерений плазменных параметров, недоступных оптической и микроволновой технике. Эти параметры реализуются в таких плазменных установках, как токамаки, стеллараторы, МГД-генераторы, мощные СВЧ-разряды,  $\Theta$ -пинчи, генераторы дуги и др. Субмм лазерная интерферометрия на основе интерферометров типа Майкельсона, Маха—Рождественского и трехзеркального с амплитудной индикацией фазы получила широкое применение в плазменных исследованиях после

создания HCN-лазера ( $\lambda = 337$  мкм) с достаточной мощностью излучения.

Первые HCN-лазеры в СССР были созданы на кафедре радиоизмерений радиофизического факультета Харьковского университета под руководством С. Ф. Дюбко [2]. Появление сообщения о создании HCN-лазера вызвало большой интерес исследователей, занимающихся диагностикой плазмы. HCN-лазеры, разработанные и изготовленные в университете, начинают использоваться в Сухумском физико-техническом институте (СФТИ), Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ) и других организациях. Однако развитие субмм лазерной интерферометрии на крупных плазменных установках сдерживалось отсутствием помехоустойчивых, малоинерционных приемников субмм излучения. Применяемые в интерферометрах на лабораторных плазменных стендах оптико-акустические и пироэлектрические приемники излучения при достаточной высокой чувствительности обладают недостаточным временным разрешением. Применяемые в мм области спектра точечно-контактные приемники с контактом кремний-вольфрам при приемлемых характеристиках весьма неустойчивы к вибрациям, что ограничивало их применение в интерферометрии плазмы. Частично эта проблема была решена при создании на кафедре радиоизмерений точечно-контактного детектора InSb-фосфористая бронза в квазиоптическом исполнении [29]. Конструкция детектора обеспечивала лучшую помехоустойчивость по сравнению с детекторами, используемыми в мм диапазоне, и большую вольтваттную чувствительность. Применение HCN-лазеров и детекторов, разработанных в университете, позволило создать субмм интерферометр с гомодинным преобразованием частоты для диагностики плазмы на лабораторной плазменной установке в СФТИ [30]. Однако применение точечно-контактных детекторов на промышленных плазменных установках было весьма проблематично из-за мощных электромагнитных полей, возникающих при работе таких установок, которые приводят к выгоранию контакта металл-полупроводник. Проблема приемников субмм излучения для интерферометрических измерений на крупных плазменных установках была решена с использованием низкотемпературных детекторов, работающих при температуре жидкого гелия.

Для детектирования излучения в субмм диапазоне длин волн 0,1–1 мм используется примесная фотопроводимость в Ge и GaAs, а также разогрев электронного газа в InSb. Для детектирования излучения HCN-лазера использовался кристалл InSb  $n$ -типа с концентрацией электронов  $n = 3,8 \cdot 10^{12}$  и  $9,5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> и подвижностью электронов  $1,7 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с

и  $3,7 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с. Первые детекторы помещались в специальные криостаты, имеющие окна для ввода излучения, что требовало ежедневной заправки криостата жидким гелием. На кафедре радиоизмерений университета было предложено размещать кристалл в транспортном криостате СТГ-25. Ввод излучения в криостат осуществлялся диэлектрическим волноводом. Фокусировка излучения на детектор производилась диэлектрическим рупором. Это позволило избежать многомодовости и получать на выходе рупора излучение с распределением поля, характерным для основной моды, что существенно при использовании детектора в режиме смесителя, а также при использовании в качестве приемника излучения в интерферометрах-поляриметрах. Время работы детектора при одноразовой заправке гелием достигало 25 суток. Вольтваттная чувствительность детектора равнялась 100 В/Вт, пороговая чувствительность —  $5 \cdot 10^{-11}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup>, инерционность — не хуже  $5 \cdot 10^{-7}$  с [31].

Создание таких детекторов позволило создавать субмм интерферометры для диагностики плазмы на крупных установках. Построенный по схеме Майкельсона интерферометр с амплитудной индикацией фазового сдвига для контроля изменения концентрации электронов в процессе разряда на трехзаходном торсатроне «Ураган 3» (ХФТИ) [32] позволил обнаружить наличие всплесков концентрации электронов в начале и конце стационарного уровня.

При создании интерферометров для крупных плазменных установок (токамак, стелларатор, МГД-генератор), где расстояние от лазера до исследуемого объекта и от объекта до приемника достигают нескольких десятков метров, актуальной является задача создания надежных, имеющих малые потери, линий передач. Открытые зеркальные линии передач в субмм диапазоне имеют большие габариты и чувствительны к вибрациям. Было предложено использовать для этих целей широкие полые диэлектрические волноводы (ШПДВ). На кафедре квантовой радиофизики проведены комплексные исследования по распространению субмм излучения по ШПДВ [33].

Интерферометр на основе HCN-лазера с ВЧ возбуждением с трактом канализации излучения на основе ШПДВ был создан для опытно-промышленной установки МГД-генератора У25Б совместно с сотрудниками Института высоких температур (ИВТАН, г. Москва). Были проведены измерения затухания и фазовых сдвигов в плазме МГД-генератора. Найдены эффективные частоты столкновений. Получено хорошее совпадение с ожидаемыми расчетными результатами [34]. Лазерная система и детекторы продемонстрировали высокую надеж-

ность в эксплуатации при ежедневной работе по 15–20 часов во время двухнедельного пуска МГД-установки.

Дальнейшие исследования по совершенствованию интерферометров субмм диапазона были направлены на увеличение пространственного разрешения путем создания многоканальных интерферометров и повышению точности измерения фазового сдвига применением гетеродинных схем индикации. На основе двухканального HCN-лазера с ВЧ накачкой разработан и создан трехканальный лазерный интерферометр для диагностики плазмы в торсатроне «Ураган 3» (совместно с сотрудниками ХФТИ) [32]. Индикация фазового сдвига осуществлялась на разностной частоте 1 МГц. Разностная частота стабилизировалась системой АПЧ. Параметры схемы обеспечивали получение сигнала на выходе с отношением сигнал/шум не хуже  $10^{-3}$ . Точность измерения фазового сдвига составляла  $10^{-2}$  п.

Дальнейшее развитие субмм лазерной интерферометрии связаны с использованием в качестве источников излучения лазеров с оптической накачкой. Для интерферометрии плазмы на крупных промышленных установках в основном использовался оптически накачиваемый излучением CO<sub>2</sub> лазера (линия 9P36) квантовый генератор на молекуле метилового спирта (CH<sub>3</sub>OH) на длине волны 118,8 мкм. Лазеры с оптической накачкой имеют более высокую монохроматичность, что позволяет уменьшить погрешность измерения фазового сдвига при применении гетеродинных схем по сравнению с интерферометрами на основе газоразрядных лазеров.

Одноканальный гетеродинный интерферометр на основе CH<sub>3</sub>OH-лазера был создан совместно с сотрудниками ХФТИ и испытан при измерении концентрации электронов в плазме отражательного разряда (аналог плазмы прямого участка стелларатора «Ураган 2») и показал надежную работоспособность [35]. Созданы многоканальные интерферометры на основе CH<sub>3</sub>OH оптически накачиваемых лазеров для диагностики плазмы стеллараторов «Ураган 2», «Ураган 2М» (ХФТИ, г. Харьков) и токамаков Т10, Т15 (ИАЭ им. И. В. Курчатова, г. Москва) [36].

При создании субмм интерферометров для диагностики узких электронных пучков на установках МРТИ (г. Москва) для уменьшения погрешности интерферометрических измерений была решена задача компенсации рефракционных искажений, возникающих из-за больших плотностей в центре пучка [37].

В работе [38] сотрудниками кафедры предложено для создания гетеродинных лазерных интерферометров использовать кольцевой субмм лазер с двунаправленной оптической накачкой. Преимуществом такого лазера является возможность получения разностной частоты (до 0,3 МГц) и простотой ее стабилизации.

Проведение всех работ по субмм интерферометрии плазмы было возможно при поддержке и активном содействии членов Комиссии по диагностике плазмы при Комитете по Атомной Энергии СССР Е. П. Горбуновым (ИАЭ им. И. В. Курчатова), Н. И. Малых (СФТИ, г. Сухуми), О. С. Павличенко (ХФТИ, г. Харьков) и В. В. Рождественским (ЛФТИ, г. Ленинград). Существенный вклад в развитие и совершенствование методов субмм интерферометрии на крупных плазменных установках внесли сотрудники ведущих научно-исследовательских институтов В. Л. Бережный, В. И. Кононенко (ХФТИ, г. Харьков), Ю. В. Скосарев (ИАЭ им. И. В. Курчатова), А. Б. Федотов (МРТИ, г. Москва), Д. Н. Юндев (ИВТ, г. Москва), А. Г. Нагорный, Е. С. Ямпольский (СФТИ, г. Сухуми), В. В. Кубарев (ИЯФ, г. Новосибирск) и др.

Основные результаты этих исследований обобщены в докторской диссертации В. А. Свища «Лазерные средства диагностики высокотемпературной плазмы в диапазоне субмиллиметровых волн», защищенной в 1990 году.

### **Литература**

1. Crocer A. A. Stimulated in the far infrared / A. A. Crocer, H. A. Gebbie, M. F. Kimmitt, L. E. S. Mathias // Nature. — 1964. — Vol. 201. — P. 250–251.
2. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровый газовый лазер непрерывного действия / С. Ф. Дюбко, Р. А. Валитов, В. А. Свич // Письма в ЖЭТФ. — 1967 — Т. 6, вып. 3. — С. 567–569.
3. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровый лазер на SO<sub>2</sub>, генерирующий на волнах 0,141 и 0,193 мм / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Р. А. Валитов // Письма в ЖТФ. — 1968. — Т. 7, вып. 11. — С. 408.
4. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровый лазер непрерывного действия, работающий на парах H<sub>2</sub>O и HCN / С. Ф. Дюбко, Р. А. Валитов, В. А. Свич // ЖТФ. — 1969. — Т. 39, вып. 6. — С. 1135–1140.
5. Шмидт В.В. Измерение частоты газового лазера с длиной волны 0,337 и 0,311 мм / В. В. Шмидт, С. Ф. Дюбко, А. Н. Топков, В. А. Свич, Р. А. Валитов // Радиотехника и электроника. — 1969. — Т. 14, № 9. — С. 1708–1709.

6. Топков А. Н. Стабилизированный НСN лазер с высокочастотной накачкой / А. Н. Топков, В. А. Свич, Н. Г. Покормяхо // ПТЭ. — 1980. — № 6. — С. 151–153.
7. Дюбко С.Ф. Газовые лазеры субмиллиметрового диапазона с накачкой излучением CO<sub>2</sub>-лазера / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Письма в ЖТЭФ. — 1972. — Т. 16, вып. 11. — С. 592–594.
8. Дюбко С.Ф. Субмиллиметровые лазеры с оптической накачкой на молекулах CH<sub>3</sub>OH и CH<sub>3</sub>OD / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // ЖТФ. — 1973. — Т. 43, № 8. — С. 1772–1773.
9. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровый лазер на парах муравьиной кислоты с накачкой излучением лазера на двуокиси углерода / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Квантовая электроника. — 1973. — Т. 5, вып. 17. — С. 128–129.
10. Дюбко С. Ф. Стимулированное излучение субмиллиметровых волн молекулами гидразина, возбужденным излучением CO<sub>2</sub>-лазера / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // ЖПС. — 1974. — Т. 20, вып. 4. — С. 718–719.
11. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровое лазерное излучение молекул CH<sub>3</sub>J, возбужденных излучением CO<sub>2</sub>-лазера / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Оптика и спектроскопия. — 1974. — Т. 37, вып. 1. — С. 208.
12. Дюбко С. Ф. Использование молекул CD<sub>3</sub>J, CH<sub>3</sub>J и CD<sub>3</sub>Cl в качестве активного вещества субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой / С. Ф. Дюбко, Л. Д. Фесенко, О. И. Баскаков, В. А. Свич // ЖПС. — 1975. — Т. 23, вып. 2. — С. 317–320.
13. Дюбко С. Ф. Субмиллиметровый лазер на молекулах HCOOH, DCOOH, HCOOD и DCOOD / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // ЖТФ. — 1975. — Т. 45, вып. 11. — С. 2458–2461.
14. Дюбко С. Ф. Экспериментальное исследование спектра излучения субмиллиметрового лазера на молекулах CD<sub>3</sub>OH / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Известия вузов. Сер. Радиофизика. — 1975. — Т. 21, вып. 10. — С. 1434–1437.
15. Дюбко С. Ф. Чувствительный к магнитному полю субмиллиметровый лазер на парамагнитных молекулах ClO<sub>2</sub> / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Письма в ЖТФ. — 1975. — Т. 1, вып. 9. — С. 409–411.
16. Дюбко С. Ф. Стимулированное излучение при оптической накачке молекул винилбромида / С. Ф. Дюбко, В. А. Свич, Л. Д. Фесенко // Квантовая электроника. — 1976. — Т. 3, № 5. — С. 1121–1122.
17. Свич В. А. Субмиллиметровый лазер с оптической накачкой на молекуле D<sub>2</sub>O<sup>12</sup> / В. А. Свич, А. Н. Топков, Н. Г. Покормяхо // Письма в ЖТФ. — 1980. — Т. 6, вып. 21. — С. 1281–1283.

18. Ефремов В. А. Усиление в трехуровневом газе, возбуждаемом двумя однонаправленными волнами / В. А. Ефремов, С. Ф. Дюбко // Изв. вузов. Сер. : Радиофизика. — 1981. — Т. 24, № 7. — С. 819–824.

19. Ефремов В. А. О возможности частотной перестройки субмиллиметровых квантовых генераторов с оптической накачкой / В. А. Ефремов, С. Ф. Дюбко // Оптика и спектроскопия. — 1981. — Т. 51, вып. 5. — С. 870–874.

20. Свич В. А. Импульсный квантовый генератор субмиллиметрового диапазона на молекулах метилбромида / В. А. Свич, Н. Г. Покормяхо, А. Н. Топков, А. Я. Аникеев // ЖПС. — 1982. — Т. 37, вып. 4. — С. 663–665.

21. Ефремов В. А. Амплитудная модуляция субмиллиметрового  $\text{NH}_3$ -лазера с двухфотонной накачкой / В. А. Ефремов, М. Н. Ефименко, С. Ф. Дюбко // Квантовая электроника. — 1987. — Т. 14, № 4. — С. 698–700.

22. Ефремов В. А. Особенности в спектре излучения молекулярных лазеров с оптической накачкой многомодовым источником / В. А. Ефремов, М. Н. Ефименко, С. Ф. Дюбко // Оптика и спектроскопия. — 1987. — Т. 63, вып. 3. — С. 674–677.

23. Ефремов В. А., Рамановское и гиперрамановское излучение молекул аммиака в диапазоне субмиллиметровых волн / В. А. Ефремов, М. Н. Ефименко, С. Ф. Дюбко // Квантовая электроника. — 1989. — Т. 16, № 7. — С. 1432–1433.

24. Епишин В. А. Исследование типов колебаний и оптимизация выходной мощности волноводных субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой / В. А. Епишин, В. А. Маслов, Н. Г. Покормяхо, В. А. Свич // Квантовая электроника. — 1989. — Т. 16, № 8. — С. 1565–1570.

25. Гурин О. В. Оптимизация металлического волноводного резонатора субмиллиметрового лазера / О. В. Гурин, А. В. Дегтярев, В. А. Маслов, В. А. Свич, В. М. Ткаченко, А. Н. Топков // Квантовая электроника. — 1997. — Т. 24, № 1. — С. 33–36.

26. Гурин О. В. Селекция поперечных мод в лазерных резонаторах, содержащих волноводные и открытые участки / О. В. Гурин, А. В. Дегтярев, В. А. Маслов, В. А. Свич, В. М. Ткаченко, А. Н. Топков // Квантовая электроника. — 2001. — Т. 31, № 4. — С. 346–350.

27. Володенко А. В. Формирование негауссовского профиля интенсивности в волноводном квазиоптическом лазерном резонаторе с асферическим зеркалом / А. В. Володенко, О. В. Гурин, А. В. Дегтярев, В. А. Маслов, В. А. Свич, А. Н. Топков // Квантовая электроника. — 2007. — Т. 37, № 11. — С. 1065–1070.

28. Епишин В. А. Обнаружение в модифицированном решетчатом резонаторе моды с равномерным амплитудным распределением на одном из зеркал / В. А. Епишин, В. А. Маслов, И. М. Милитинский // Письма в ЖТФ. — 1991. — Т. 17, вып. 2. — С. 1–5.

29. Дюбко С. Ф. Детектируемые свойства точечного контакта металл – InSb на волне 337 мкм при  $T = 300 \text{ K}$  / С. Ф. Дюбко, М. Н. Ефименко // Письма ЖТФ. – 1967. – Т. 6, № 3. – С. 567.
30. Малых Н. И. Интерферометрия высокотемпературной плазмы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн / Н. И. Малых, Е. П. Горбунов, Е. С. Ямпольский // Сухуми: СФТИ, 1978. – 26 с. (Препринт СФТИ: 36 – 24).
31. Гоцкало М. П. Детектор на разогреве электронов InSb / М. П. Гоцкало, В. А. Свич, А. Н. Топков, Н. А. Шеховцов // Высокочастотные свойства твердых тел : Сб. науч. тр. – К., Наукова думка. – 1985. – С. 188–191.
32. Бережный В. Л. Многоканальный гетеродинный интерферометр на длине волны 337 мкм для диагностики плазмы / В. Л. Бережный, В. И. Кононенко, О. С. Павличенко, А. Я. Анисеев, В. Н. Диденко, В. А. Епишин, В. А. Маслов, В. Н. Рябых, В. А. Свич, А. Н. Топков, В. М. Ткаченко // ПТЭ. – 1990. – № 5. – С. 178–182.
33. Епишин В. А. Передача субмиллиметровых лазерных пучков по волноводам вида канал в диэлектрике / В. А. Епишин, В. А. Маслов, В. Н. Рябых, В. А. Свич, А. Н. Топков // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 4. – С. 480–484.
34. Епишин В. А. Волноводный субмиллиметровый лазерный интерферометр для диагностики плазмы / В. А. Епишин, Н. Г. Покормяхо, В. А. Свич, А. Н. Топков, А. С. Уринсон, Д. Н. Юндев // ПТЭ. – 1981. – № 1. – С. 149–151.
35. Бережный В. Л. Субмиллиметровый гетеродинный лазерный интерферометр / В. Л. Бережный, В. А. Епишин, В. И. Кононенко, О. С. Павличенко, В. А. Свич, А. Н. Топков, В. А. Маслов. – Харьков, 1982. – 57 с. – (Препринт / ХФТИ: 82 – 48).
36. Бережный В. Л. Многоканальные интерферометры дальней инфракрасной области для измерения плотности электронов в стеллараторе «Ураган 2М» / В. Л. Бережный, В. И. Кононенко, В. Л. Очеретенко, В. А. Свич, В. А. Маслов, А. Н. Топков // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20, № 1. – С. 15–16.
37. Епишин В. А. Компенсация рефракционных искажений волнового пучка при помощи волноводов вида канал в диэлектрике / В. А. Епишин, В. Н. Рябых, В. А. Свич, А. Н. Топков, А. Б. Федотов // Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15, вып. 16. – С. 58–61.
38. Диденко В. Н. Кольцевой  $\text{CH}_3\text{OH}$ -лазер с двунаправленной оптической накачкой / В. Н. Диденко, В. А. Свич, В. М. Ткаченко, А. Н. Топков // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 7. – С. 809–812.