

Исследования в области твердотельной и вакуумной электроники, проводимые на радиофизическом факультете

(Э. Д. Прохоров)

Работы по твердотельной электронике начались в 1953 г. в период организации радиофизического факультета. Исследования по твердотельной электронике развивались на специализации «Физика полупроводников» вначале при кафедре радиоизмерений (зав. каф. проф. Р. А. Валитов), с 1956 г. — при кафедре физики СВЧ (зав. каф. проф. А. И. Терещенко), с 1960 г. — при кафедре общей физики (зав. каф. доц. Б. Г. Сидоренко). Инициатором этих исследований был зав. специализацией ст. преп. Л. А. Зубрицкий. Была создана технологическая база, которая позволяла исследовать физические процессы в полупроводниковых материалах и приборах и разрабатывать новые типы полупроводниковых приборов. Активно участвовали в этом преподаватели Л. А. Зубрицкий, О. М. Коновалов, В. В. Борзенко, Н. А. Шеховцов.

В конце 50-х — середине 60-х годов сотрудниками специализации и лаборатории проводились интенсивные исследования физических явлений в полупроводниках с целью создания новых полупроводниковых приборов, измерения параметров полупроводниковых приборов и материалов, создания эпитаксиальных пленок (Н. А. Шеховцов, Э. Д. Прохоров, Е. А. Карасик, А. А. Мишнев, В. В. Борзенко, Г. В. Багров, И. А. Рыжак, Э. А. Демьянов, В. Н. Колесник), создания твердотельных индикаторов СВЧ излучения (В. М. Светличный, В. Т. Плаксий), волноводных детекторов больших уровней мощности (В. А. Петров).

Исследования проводились сотрудниками специализации и Проблемной лаборатории полупроводниковой техники, которая была создана в связи с высоким уровнем разработок в области полупроводниковой электроники Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 78-27 от 24.01.1961 г. и Постановлением ЦК КПУ и СМ УССР № 478-0042 от 07.04.1961 г.

В 1974 году была организована кафедра полупроводниковой и вакуумной электроники (зав. каф. проф. Э. Д. Прохоров) на основе специализации «Физика полупроводников», кафедры электроники (зав. каф.

доц. В. Н. Костин) и Проблемной лаборатории полупроводниковой техники (научн. руков. проф. Р. А. Валитов, проф. Э. Д. Прохоров).

Второй этап исследований можно отнести от середины 60-х годов до 90-х годов, когда благодаря открытию новых эффектов в полупроводниках и полупроводниковых структурах началось продвижение частотных возможностей полупроводниковых приборов в см и мм диапазоны. Это переместило научные интересы сотрудников специализации «Физика полупроводников» и Проблемной лаборатории полупроводниковой техники а с 1974 г. и кафедры полупроводниковой и вакуумной электроники в область высокочастотных эффектов в полупроводниках и приборов на их основе.

Была сформирована основная научная проблема кафедры: «Исследование разогрева электронного газа в полупроводниках и полупроводниковых структурах с целью создания высокоэффективных генераторов, усилителей и индикаторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов». Научные исследования велись по следующим основным направлениям:

1. Исследование междолинного переноса электронов (МПЭ) в полупроводниках A_3B_5 и их соединениях и полупроводниковых структурах на их основе с целью создания высокоэффективных генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов (науч. рук. проф. Э. Д. Прохоров).

Исследование МПЭ и диодов на его основе начались в 1966 г., была получена впервые в СССР генерация в дециметровом и см диапазонах в импульсном и непрерывном режимах, исследованы закономерности ударной ионизации и новые режимы работы (Э. Д. Прохоров, В. Н. Арендарь, В. А. Шалаев, Н. И. Белецкий, А. В. Дядченко, Г. В. Багров). Результаты обобщены в монографии Р. А. Валитов, Б. И. Макаренко, Э. Д. Прохоров и др. «Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет» (М. : Сов. радио, 1973. — 464 с.).

Впервые была исследована ударная ионизация в доменах сильного поля диодов с МПЭ (Э. Д. Прохоров, В. А. Шалаев, Н. И. Белецкий) и получены фундаментальные научные результаты: введено представление о ширине ВАХ диода Ганна; определен верхний по критерий для диодов Ганна, построена теория движения домена с учетом ударной ионизации, показана возможность генерации на гармониках за счёт ударной ионизации

Одновременно проводились интенсивные исследования особенностей взаимодействия диодов Ганна с внешней цепью с различными режимами работы в различных колебательных системах (Э. Д. Прохоров, В. Н. Арендарь). Экспериментально обнаружен и теоретически обоснован гибридный режим работы диодов Ганна в резонансных системах см-диапазона, показано, что в гибридном режиме при работе диода в резонансной системе, включающей первую и вторую гармоники, возможно получение КПД до 30...32 %.

Использование метода, основанного на решении кинетического уравнения Больцмана, позволило существенно продвинуться в теоретическом определении частотных возможностей приборов и материалов с МПЭ, выявить перспективные соединения полупроводников A_3B_5 , в которых возможен эффект МПЭ и многие из них исследовать (Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий, А. В. Дядченко.). Полученные теоретические и экспериментальные результаты были обобщены в монографиях: Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий «Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов» (Х. : Вища школа, 1982. — 136 с.); Р. А. Валитов, Э. Д. Прохоров, В. М. Светличный и др. «Измерения на мм и субмм волнах. Методы и техника» (М. : Радио и связь, 1984.—295 с.).

Впервые был реализован новый подход к рассмотрению динамических процессов в коротких диодах, основанный на совместном решении кинетического уравнения Больцмана и уравнения Пуассона (Э. Д. Прохоров, Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, С. И. Санин, И. П. Стороженко) и были получены новые фундаментальные результаты по влиянию контактов, гетероконтактов, неоднородностей, профилей легирования на эффективность работы приборов с МПЭ на основной частоте и гармониках.

Впервые исследована ударная ионизация и лавинно-пролетный эффект в катодных статических доменах, что позволило создать высокоэффективные источники СВЧ-шума см и мм диапазонов (Э. Д. Прохоров, С. Н. Скоробогатова, Е. С. Золотарёв).

В результате проведенных исследований разработаны экспериментальные диоды и генераторы см и мм диапазонов (В. Н. Арендарь, Э. Д. Прохоров, Н. Е. Полянский, А. В. Дядченко, Е. С. Золотарев): импульсные диоды Ганна и диоды Ганна, работающие в непрерывном режиме на частотах см и мм диапазонов (3...220 ГГц) в волноводном, коаксиальном и микрополосковом исполнении; широкополосные генераторы на диодах Ганна с электронной перестройкой частоты, генераторы

на диодах Ганна на основе многодиодных сумматоров, работающие в непрерывном режиме в диапазоне частот 3...150 ГГц, генераторы СВЧ-шума на основе диодов с катодным статическим доменом в диапазоне частот 3...120 ГГц.

2. Исследование разогрева электронного газа в полупроводниках для создания эффективных индикаторов СВЧ излучения (науч. рук. доц. В. М. Светличный). В этом направлении был получен ряд фундаментальных научных результатов (В. М. Светличный, В. Т. Плаксий, А. И. Сатюков, А. И. Костин, А. И. Стариков), разработаны быстродействующие датчики малых уровней мощности на горячих носителях заряд, датчики больших уровней мощности см и мм диапазонов и индикаторы СВЧ излучения на основе полуметаллов на частоты до 150 ГГц. Полученные результаты обобщены в монографии Н. Н. Белецкий, В. М. Светличный, Д. Д. Халамейда, В. М. Яковенко «Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах» (К. : Наукова думка, 1991. — 216 с.).

3. Исследование электронно-дырочных процессов в диодных структурах с различными контактами и взаимодействие их с магнитным полем и электромагнитным излучением мм диапазона (науч. рук. доц. Н. А. Шеховцов). В результате проводимых исследований (Н. А. Шеховцов, А. А. Мишнев, Л. С. Ротач) разработаны германиевые модуляторы мощности электромагнитного излучения на диапазоны частот 54...75 ГГц и магниточувствительные датчики.

С начала 90-х годов ситуация с проведением исследований изменилась, не стало финансирования по хозяйственной тематике, осталось только бюджетное финансирование. В связи с этим круг исследований сузился. Остались фундаментальные темы, связанные с междолинным переносом электронов в различных полупроводниковых соединениях в сочетании с туннельными, резонансно-туннельными и лавинными эффектами. Были продолжены исследования соединений полупроводников A_3B_5 и субмикронных диодных структур на их основе, твердотельных активных элементов для генерации в мм диапазоне.

Исследование динамических процессов в диодах проводилось с помощью температурной модели, основанной на усреднении кинетического уравнения Больцмана по концентрации, импульсу и энергии совместно с уравнением Пуассона (Ю. В. Аркуша, А. А. Дрогаченко, Э. Д. Прохоров, С. И. Санин, И. П. Стороженко). С помощью указанного подхода были получены новые фундаментальные результаты: определены частотные возможности целого ряда соединений с МПЭ;

показано как влияют запорные и антизапорные контакты на максимальную частоту генерации; показана возможность расширения частотных возможностей диодов с МПЭ при использовании их в качестве нелинейных элементов умножителей частоты; показано, что модуляция проводимости активной области диодов с помощью туннельной инжекции и использование индуцированного канала, создаваемого гетероструктурой, позволяют увеличить частотный предел работы приборов с МПЭ; показано, что сложная форма напряжения на диоде, содержащая 2-ю и высшие гармоники позволяет расширить частотный диапазон работы диодов с МПЭ на основе GaAs до 500 ГГц.

Исследованы диоды с ударной ионизацией электронов, захваченных на ловушки, которые могут быть источниками СВЧ шума (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула). Такие диоды при определенных условиях могут быть модуляторами СВЧ излучения или генераторами СВЧ излучения.

Исследованы резонансно-туннельные диоды, которые по механизму переноса электронов являются наиболее высокочастотными приборами, способными работать в мм и субмм диапазонах. Проведенные в этом направлении исследования позволили определить эффективность генераторов на различных РТД (таких как AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlAs, AlAs/GaAs) на основной частоте и гармониках и эффективность умножителей частоты на указанных выше РТД. Исследованы диоды Ганна с туннельным катодом металл-диэлектрик-полупроводник, которые позволяют увеличить эффективность генерации диодов и расширить частотный диапазон их работы (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, И. П. Стороженко).

В эти годы были продолжены исследования, связанные с МПЭ, приборами на его основе, с новыми полупроводниковыми соединениями, новыми приборами для целей микро- и нанoeлектроники.

Исследован междолинный перенос электронов в тройных соединениях полупроводников A_3B_5 , таких как $InP_{1-x}As_x$, $In_{1-x}Ga_xAs$, $Al_{1-x}Ga_xAs$, определены зависимости скорость-поле всех соединений по составу, показано какой эффективностью генерации обладают диоды Ганна на основе этих соединений, определены перспективные составы соединений на основе которых диоды Ганна могут превосходить арсенид галлия (Ю. В. Аркуша, И. П. Стороженко).

Исследован междолинный перенос электронов в варизонных структурах диодов Ганна мм диапазона на основе соединений $InP_{1-x}As_x$, $In_{1-x}Ga_xAs$, $Al_{1-x}Ga_xAs$. Исследовано влияние контактов на варизонные

структуры диодов Ганна, определены оптимальные контакты при которых диоды Ганна обладают наибольшими эффективностями генерации в мм диапазоне. Показано, что варизонные структуры диодов Ганна с катодными контактами в виде зарубки или металла обладают высокими значениями эффективности генерации в мм и коротковолновой части мм диапазона (Ю. В. Аркуша, И. П. Стороженко).

Исследованы физические процессы в новых перспективных полупроводниковых приборах мм диапазона на основе полупроводников A_3B_5 с туннельными и резонансно-туннельными катодными контактами. Определены их эффективности генерации в широком диапазоне частот мм-диапазона (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула)

Исследована ударная ионизация в катодных статических доменах сильного электрического поля и показано ее влияние на спектральную плотность мощности шума и умножение частоты. Экспериментально исследована перестройка частоты в широкополосных GaAs-генераторах и генераторах шума в диапазоне частот 60 ...75 ГГц (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, А. В. Дядченко).

Исследованы резонансно-туннельные диоды (РТД) на основе нитридов $AlN/Al_xGa_{1-x}N$, $GaN/In_xGa_{1-x}N$. Показано, что они имеют до 3–5 участков ОДП на ВАХ, эффективность генерации на каждой составляет 10...30 % на частотах до 1 ТГц. Исследовано влияние ударной ионизации в диодах с МПЭ на генерацию гармоник, генерацию на гармониках и умножение частоты (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула).

На кафедре физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий» (зав. каф. проф. В. А. Катрич) в 2007–2012 гг. были продолжены исследования МПЭ в новых полупроводниковых соединениях, варизонных структурах, резонансно-туннельных структурах, диодах с различными боковыми границами, явлений переноса носителей в сложных двумерных и трехмерных структурах в GaAs, нитридах и их соединениях.

Исследованы варизонные структуры с МПЭ на основе нитридов. Определены дрейфовые скорости электронов в $In_xGa_{1-x}N$, $Al_xGa_{1-x}N$, $Al_xIn_{1-x}N$, GaN , InN , AlN . Определены КПД диодов Ганна на основе этих соединений в диапазоне частот. Показано, что такие диоды могут работать в диапазоне частот 0,6–1 ТГц с КПД порядка нескольких процентов. В варизонных диодах на основе нитридов наблюдается в 1,5 раза большие КПД по сравнению с однородными структурами (Ю. В. Аркуша, И. П. Стороженко).

Исследованы энергетические и частотные характеристики диодов Ганна на основе нитридов в двухконтурном резонаторе. Разработана многоуровневая температурная модель МПЭ в варизонных полупроводниках. На основе разработанной модели исследованы динамические процессы в диодах Ганна на основе нитридов в однородных по легированию и варизонных структурах. Показано, что использование сложной формы напряжения улучшает энергетические и частотные характеристики однородно легированных и варизонных диодов Ганна (Ю. В. Аркуша, И. П. Стороженко).

Исследованы основные закономерности ударной ионизации в диодах на основе нитридов (AlN , GaN , InN и их соединений), определены критерии устойчивой работы диодов по параметру n_0L , ширина ВАХ диодов на основе нитридов, максимальные эффективности генерации диодов с ударной ионизацией на основе нитридов. Определены коэффициенты преобразования (КПЧ) диодами на основе нитридов (AlN , GaN , InN) и показана возможность увеличения КПЧ за счет развития ударной ионизации (Э. Д. Прохоров, Д. В. Павленко).

С помощью разработанного метода Монте-Карло определены зависимости скорость-поле двумерных структур на основе нитридов в диапазоне температур 300 ... 700 К и исследованы их частотные возможности. Определены эффективности генерации диодов с МПЭ с различными контактами на основе нитридов и показана возможность генерации с помощью таких диодов в терагерцовом диапазоне 600...1000 ГГц (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула).

Предложен новый класс приборов с боковыми туннельными, резонансно-туннельными, туннельно-триодными и гетерограницами. Показана возможность генерации такими диодами в терагерцовом диапазоне с высокой эффективностью (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко).

Исследованы с использованием метода Монте-Карло спектральные характеристики диодов с катодным статическим доменом на основе GaAs с различными параметрами прикатодной области, различными параметрами катода в широком диапазоне температур 77 К...300 К. Показано на каких частотах при различных параметрах диодов наблюдается максимум спектральной плотности мощности шума. Экспериментально показана возможность создания генераторов шума в мм диапазоне (Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, А. В. Дядченко).

Исследованы физические процессы в полупроводниковых соединениях ZnSe , CdZnTe , CdTe , CdS и диодах Шоттки на их основе под

действием излучения ультрафиолетового (УФ) диапазона (0,3–0,4 мкм). Разработана технология изготовления диодов Шоттки на основе ZnSe, CdZnTe с металлическими контактами. Исследованные характеристики таких диодов свидетельствуют о возможности создания детекторов УФ диапазона на основе ZnSe, CdZnTe (Н. И. Белецкий, Н. Е. Полянский).

Исследованы энергетические и спектральные характеристики детекторов на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 и A_2B_6 при действии электромагнитного излучения оптического и КВЧ диапазона. Исследованы физические явления на границе металлического контакта с полупроводниками A_3B_5 и A_2B_6 при воздействии оптического излучения, особенности протекания тока через контакт металл-полупроводник и влияние этих особенностей на энергетические и спектральные характеристики экспериментальных детекторов излучения (Н. И. Белецкий, Н. Е. Полянский).

Исследования в области вакуумной электроники

Со дня основания кафедры электроники до начала 60-х годов основным направлением научной работы коллектива кафедры являлась разработка теории интенсивных электронных пучков и экспериментальное исследование электронных пушек, формирующих интенсивные электронные пучки цилиндрической и трубчатой формы (зав. каф. проф. Н. С. Зинченко). В этот период был разработан оригинальный метод исследования интенсивных электронных пучков — метод вибрирующего зонда и заложены основы теории и практики разработки высокоперевансных электронных пушек. Впоследствии эти работы были успешно продолжены в ИРЭ НАН Украины (Н. С. Зинченко, А. П. Моторенко).

В начале 60-х годов на кафедре электроники начинаются экспериментальные исследования в области газового разряда и физики плазмы, которые продолжились на кафедре полупроводниковой и вакуумной электроники. Начало этому направлению положили работы доц. В. Н. Костина (заведовавшего кафедрой электроники) по изучению воздействия магнитного поля на работу счётчиков фотонов ионизирующего излучения.

Газоразрядная и плазменная тематика развивалась и включала и тлеющий разряд (В. М. Ткаченко), и высокочастотный разряд (В. Н. Костин, В. В. Белоус, В. М. Ткаченко), и импульсный разряд (В. Н. Костин, Н. И. Винокуров). Но к середине 70-х — началу 80-х годов основное внимание научного коллектива сосредоточилось на ис-

следовании физических процессов в разряде с полым катодом и возможности его практического применения.

Систематичность исследований и разнообразие используемых экспериментальных методов (зондовые и спектральные измерения, зондирование СВЧ полями и др.) позволили получить ряд ценных физических результатов (В. М. Ткаченко, В. Б. Тютюнник, В. А. Тиманюк), существенно расширивших представления о механизме разряда с полым катодом. Получен ряд фундаментальных результатов:

- исследована функция распределения электронов по энергиям в отрицательном свечении цилиндрического полого катода; показано, что при низких давлениях газа функция распределения близка к максвелловской; в области оптимальных давлений в точках пространства с максимальной концентрацией плазмы функция распределения имеет вид равнобедренного треугольника до энергий ~ 5 эВ с плавным «хвостом» в область энергий 10...30 эВ.

- показано, что при низких давлениях газа электроны уходят через открытые торцы катодной полости в результате рассеяния и попадания на противоположные участки катода; при высоких давлениях газа возрастают рекомбинационные потери в приосевых областях полости;

- на основании предложенной модели разряда с полым катодом рассчитаны вольтамперные характеристики, которые хорошо согласуются с экспериментом при низких давлениях газа;

- показано, что при кольцевой геометрии катодной полости расширена область оптимальных давлений полого катода и появляются новые возможности его использования, в частности, возможность модуляции интенсивности спектральных линий атомов металлов, что повышает чувствительность атомно-абсорбционного анализа.

Тлеющий разряд с полым катодом благодаря характерной функции распределения электронов по скоростям, практически полному отсутствию поля и низкой температуре газа в свечении нашел применение в оптической спектроскопии, СВЧ технике, газовых лазерах и т. д. На основе тлеющего разряда разработаны волноводные фазовращатели с использованием разряда с полым катодом, которые позволяют регулировать фазу электромагнитных волн 8- и 4-мм диапазонов в пределах до 4π при затухании ~ 3 дБ, управляемые элементы антенной техники, основанные на использовании плазмы полого катода, показавшие приемлемые для практики параметры и ряд других устройств, защищённых авторскими свидетельствами.

Выполнен ряд прикладных работ, позволивших создать приборы для неразрушающего контроля ламп накачки твердотельных лазеров, малогабаритные источники УФ излучения для люминесцентного анализа в медицине, геологии, криминалистике. Разрабатываются схемы питания ртутно-кварцевых ламп, предназначенные для малогабаритных устройств люминесцентного анализа. Созданы опытные образцы приборов для экспресс-анализа защитных свойств различных сортов стекла, полимеризации УФ отверждаемых клеевых соединений, лаков и др.

Большое внимание кафедра уделяет подготовке кадров высшей квалификации. Преподавателями кафедры и сотрудниками Проблемной лаборатории защищены 4 докторских (Н. С. Зинченко, Э. Д. Прохоров, Ю. В. Аркуша, И. П. Стороженко) и 28 кандидатских диссертаций. Преподавателями и сотрудниками кафедры опубликовано 6 монографий, 10 учебных пособий (в том числе с грифом МОН Украины), 42 методических указания по различным курсам, читаемым на кафедре, более 600 статей в отечественных и зарубежных журналах, более 450 докладов на международных и республиканских конференциях, симпозиумах, получено более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Разработанные на кафедре приборы неоднократно представлялись на Выставках достижений народного хозяйства и отмечены 3 серебряными, 4 бронзовыми медалями, 2 дипломами.

Профессор В. М. Яковенко избран академиком НАН Украины в 2000 г.

Профессор Э. Д. Прохоров избран академиком АН ВШ Украины в 1995 г.

Профессором В. М. Яковенко и профессором Э. Д. Прохоровым получено 2 гранта фонда Сороса по номинации «профессор» в 1998 г.

Научные работы отмечены:

1. Дипломом, Премией и Медалью МОН Украины «За лучшую научную работу» в 1984 г. монография Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий «Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов» (Х. : Вища школа, 1982. — 144 с.).

2. Дипломом и медалью лауреата нагороды им. Ярослава Мудрого АН ВШ Украины за значительные достижения в области науки и техники, Э. Д. Прохоров, 2004 г.

3. Дипломом и премией АНВШ Украины в 2006 г. за лучшее учебное пособие — Прохоров Э. Д. «Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах» (Х. : ХНУ имени

В. Н. Каразина, 2005. — 220 с. (реком. МОН Украины)) на рус. и укр. языках.

4. Дипломом и премией АН ВШ Украины в 2008 г. за лучшее учебное пособие — Прохоров Э. Д. «Твердотельная электроника» (Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008.— 546 с. (реком. МОН Украины)) на рус. и укр. языках.

5. Дипломом «Заслуженный научный сотрудник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина» — Э. Д. Прохоров, 2006 г.

6. Дипломами и премиями Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина в 2006 г. и в 2008 г. — Э. Д. Прохоров за учебные пособия по твердотельной электронике «Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах» (Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2005. — 220 с. (реком. МОН Украины)) и «Твердотельная электроника» (Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. — 546 с. (реком. МОН Украины)).

7. Получен ряд премий за выполнение НИР по постановлениям Директивных органов (1958—1990 гг.). Получены премии по грантам МОН Украины (1992—2012 гг.).

8. Сотрудники и преподаватели кафедры неоднократно отмечались премиями, благодарностями, наградами за отличные успехи в работе. Знак МВССО СССР «За отличные успехи в работе» (Э. Д. Прохоров, Ю. В. Аркуша), «Изобретатель СССР» (Э. Д. Прохоров, В. М. Ткаченко), медалью «Ветеран труда» (Э. Д. Прохоров, Н. А. Шеховцов, А. В. Дядченко).