

УДК 621.315.592

Открытие полупроводников $A^{III}B^V$: физические свойства и применение (Обзор)

© М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев[†], Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] E-mail: mkd@iopt2.ioffe.ru

(Получена 11 октября 2018 г. Принята к печати 16 октября 2018 г.)

Настоящий обзор работ посвящен открытию, разработке технологии и исследованию полупроводников $A^{III}B^V$, проводимых в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (ФТИ, Физтех), где в 1950 г. были сделаны первые шаги в получении полупроводников $A^{III}B^V$ и начальные исследования их фундаментальных свойств под руководством двух крупных ученых — Нины Александровны Горюновой и Дмитрия Николаевича Наследова. Дальнейшее развитие этих работ нашло отражение в трудах последователей и учеников Д.Н. Наследова, работавших и продолжающих работать в подразделениях ФТИ. Будет рассмотрен вклад этих исследований в изучение гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$, а также в разработку полупроводниковых приборов для электроники, оптоэлектроники и фотоники.

DOI: 10.21883/FTP.2019.03.47278.8998

1. Открытие и начало исследований полупроводников $A^{III}B^V$

Исследования полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ в Советском Союзе были начаты в первой половине 1950-х годов в ФТИ АН СССР (Ленинград). Впервые экспериментальное доказательство того, что соединения $A^{III}B^V$ являются полупроводниками, было дано на примере типичного представителя этой группы — антимонида индия. Выдающийся химик-исследователь Н.А. Горюнова предположила, что по аналогии с изоморфным ему серым оловом $InSb$ должен обладать полупроводниковыми свойствами. Об этом было сообщено А.А. Регелем с сотрудниками на VIII Всесоюзном совещании по свойствам полупроводников в г. Киеве в 1950 г. [1]. Д.Н. Наследов, заведующий лабораторией полупроводников, принял решение поддержать работы Н.А. Горюновой (см. фото, рис. 1) по антимониду индия и расширить исследования на весь класс материалов данного типа [2,3]. Нужны были большая научная смелость и предвидение, чтобы принять подобное решение. Соединениями $A^{III}B^V$ в то время занималась только одна лаборатория в мире — лаборатория профессора Х. Велькера в ФРГ [4]. Мир был безоглядно увлечен германием и кремнием. Казалось, что с этими элементарными полупроводниками, поднявшими электронику на совершенно новую ступень, принципиально не может конкурировать ни один более сложный материал.

Первое важное сообщение об исследованиях соединений $A^{III}B^V$ ($InSb$, $InAs$) в Физтехе было сделано Д.Н. Наследовым на 1-й Всесоюзной конференции по полупроводникам (г. Ленинград, 1956 г.). Уже в том же 1956 г. в ФТИ была защищена первая кандидатская диссертация по полупроводникам $A^{III}B^V$, выполненная под его руководством аспирантом А.Ю. Халиловым [5].

Д.Н. Наследов отмечал, что наряду с другими эффектами ни электропроводность, ни эффект Холла в новых материалах не зависят от температуры. Многим это казалось странным и даже случайным. Однако уже в



Рис. 1. Д.Н. Наследов и Н.А. Горюнова — руководители I Всесоюзной конференции по полупроводниковым соединениям (Москва, 1959 г.).



Рис. 2. Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин и Б.В. Царенков — лауреаты Ленинской премии 1964 г. за работы по созданию полупроводниковых лазеров.

ближайшие годы обнаружилось, что этот результат является следствием сильного вырождения электронного газа, которое типично для сильнолегированных (тогда — просто „грязных“) полупроводников $A^{III}B^V$. Принципиально новые эффекты в таких кристаллах составили в дальнейшем новый раздел физики полупроводников — физики сильнолегированных материалов [6–8]. Уже к концу 50-х–началу 60-х годов настойчивые усилия по получению соединений $A^{III}B^V$ дали свои первые результаты. Очистку, легирование и выращивание кристаллов можно было проводить подобно тому, как это делалось для Ge и Si, технологические проблемы также постепенно разрешались. Чистые кристаллы GaAs с концентрацией электронов $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью до $6 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре были получены Г.Н. Талалакиным при использовании зонной отчистки в методе Бриджмена [2,8]. В.В. Галаванов и К.И. Виноградова получили зонной плавкой и исследовали чистейшие в мире кристаллы InSb: концентрация электронов достигала $n \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu \approx 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 77 К [9]. Эти параметры являются рекордными по настоящее время.

Группа О.В. Емельяненко продолжила исследования явлений переноса в соединениях $A^{III}B^V$. Наиболее интересными оказались исследования примесной зоны в GaAs [10], а позднее открытие гигантского магнитосопротивления при движении носителей по состояниям примесей, изучение перехода „металл–полупроводник“, определение природы отрицательного (квантового) магнитосопротивления [11]. Были изучены свойства примесей, явления переноса, фотоэлектрические явления, эффекты выпрямления в InSb, InAs, GaAs, AlSb, InP [2,12–15]. Арсенид галлия, как и ряд других полупроводников $A^{III}B^V$, имеет сферическую зону проводимости с центром в той же точке зоны Бриллюэна при $k = 0$, что и валентная зона. Эта принципиальная особенность соединений $A^{III}B^V$ отличает их от огромного числа других, непрямозонных, полупроводников (в том числе Ge и Si), при этом вероятность получения рекомбинационного излучения в них приближается к 100%. Эти

и другие результаты убедительно показали, что соединения $A^{III}B^V$ характеризуются гораздо более широким набором управляемых полупроводниковых свойств по сравнению с Ge и Si и весьма привлекательны как для физики, так и для техники полупроводников. Круг исследователей, работающих с соединениями $A^{III}B^V$, как и сама тематика, теперь стремительно расширяются. В 1957 г. группа по исследованию полупроводников $A^{III}B^V$ в Физтехе преобразуется в лабораторию электронных полупроводников. Под патронажем Д.Н. Наследова возникают исследовательские центры по работе с полупроводниками $A^{III}B^V$ в других городах Советского Союза (Баку, Кишиневе, Ашхабаде, Владикавказе и др.). В соревнование вступают институты Москвы, Украины, зарубежные лаборатории, но в условиях быстро растущей научной конкуренции лаборатория Д.Н. Наследова делает рывок, определивший главную линию в судьбе соединений $A^{III}B^V$ [2].

В 1962 г. А.А. Рогачевым при исследовании излучательной рекомбинации было показано, что спектр электролюминесценции p – n -переходов на основе GaAs заметно сужается с увеличением тока. Это было первым в мире наблюдением стимулированного излучения в полупроводниках [16]. Светоизлучающая структура была создана сотрудниками лаборатории Д.Н. Наследова (В.Е. Седовым и Б.В. Царенковым). В 1964 г. Д.Н. Наследов, С.М. Рывкин, А.А. Рогачев и Б.В. Царенков (на фото, рис. 2) вместе с сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева (Б.М. Вул, О.Н. Крохин, А.М. Прохоров, Ю.М. Попов, А.Н. Шотов) за фундаментальные исследования, приведшие к созданию квантовых генераторов, были удостоены Ленинской премии.

В лаборатории Д.Н. Наследова формируется новое направление твердотельной физики и техники — оптоэлектроника. Для создания оптоэлектронных приборов на основе бинарных и варизонных трехкомпонентных соединений полупроводников $A^{III}B^V$ в Физтехе был впервые разработан метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) (А.Т. Гореленок, Б.В. Царенков, Ю.М. Бурду-

ков, Ю.П. Яковлев) как в открытой, так и в закрытой системах [17,18]. В последующие годы методики с использованием ЖФЭ, разработанные в лаборатории Д.Н. Наследова, были широко использованы в других полупроводниковых лабораториях института. Активно развиваются работы по исследованию излучательной рекомбинации (Н.В. Зотова, Н.П. Есина) [19] и созданию первых полупроводниковых лазеров и светодиодов на основе $p-n$ -структур из GaAs, GaP и варизонных $p-n$ -структур в системах твердых растворов GaAlAs, GaAlSb для видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов (Б.В. Царенков с сотр.) [20,21]. Изготавливаются первые туннельные диоды (А.Н. Именков) и поверхностно-барьерные структуры на основе соединений $A^{III}B^V$ (Ю.А. Гольдберг и Е.А. Поссе). Получены первые солнечные элементы из GaAs, которые показали рекордный для того времени КПД (6–8%) [22]. Исследование процессов рекомбинации неравновесных носителей заряда и создание элементной базы оптоэлектроники — фотоприемников и излучателей — становится одним из ведущих направлений научной работы лаборатории.

Высокий уровень научных разработок излучательных приборов в лаборатории Д.Н. Наследова обеспечил фундаментальную и материальную базу для их внедрения в промышленное производство. В 1960 г. было принято постановление Совета министерства СССР о развитии работ по созданию приборов на основе арсенида и фосфида галлия. В работе принимали участие лаборатории Д.Н. Наследова и Н.А. Горюновой (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) и завод „Старт“ (г. Москва). Вскоре завод „Старт“ (С.С. Мескин, В.Н. Равич, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, А.Л. Гофштейн) при творческой поддержке сотрудников лаборатории Д.Н. Наследова (Б.В. Царенков, А.Т. Гореленок, А.Н. Именков, В.В. Евстропов, Ю.П. Яковлев) осваивает промышленный выпуск первых в СССР лазеров на основе GaAs, а также светодиодов инфракрасного и видимого диапазонов спектра [23,24].

В 1964–1966 гг. Д.Н. Наследовым с сотрудниками Ю.С. Сметанниковой и Ю.Г. Поповым было открыто и изучено новое физическое явление, обусловленное разогревом электронов светом, — осцилляции фотопроводимости и фотомагнитного эффекта при низких температурах в узкозонном полупроводнике InSb [25]. Позднее эти эффекты были обнаружены в InAs, GaSb, GaAs [2,26–28]. Работы по разогреву и охлаждению электронно-дырочной плазмы в полупроводниках получили международную известность и широко цитируются в статьях и монографиях [29].

Работы лаборатории по исследованию фотоэлектрических явлений в $A^{III}B^V$, а также разработка методов получения $p-n$ -переходов в антимониде и арсениде индия привели к созданию первых отечественных высокочувствительных приемников ИК излучения. Надо отметить, что фотодетекторы (фоторезисторы и фотодиоды) на основе InSb и InAs (В.В. Галаванов, В.Н. Ивахно, С.В. Слободчиков, М.П. Михайлова) были



Рис. 3. Фото стеклянных дюаров, охлаждаемых жидким азотом, с фоторезисторами из InSb (1961 г.).

созданы одновременно с аналогичными приемниками излучения за рубежом и превосходили по своим параметрам лучшие зарубежные образцы. Эти разработки были переданы для внедрения в промышленное производство [30–32]. Так, глубокоохлаждаемые фоторезисторы на основе InSb были освоены в серийном производстве на заводе „Мосдеталь“ (ныне „Сапфир“) и послужили основой для создания многоэлементных матричных приемников и их промышленного выпуска для задач телепеленгации и специальных применений в спектральном диапазоне 3–5 мкм (рис. 3) [33]. За разработку технологии получения арсенида галлия и антимонида индия, организацию их промышленного производства Д.Н. Наследов и Ю.М. Бурдуков (см. фото, рис. 4) в 1974 г. (вместе с сотрудниками ГИРЕДМЕТА и завода полупроводниковых материалов в Светлогорске) были удостоены Государственной премии СССР.

Лаборатория Д.Н. Наследова была неоднократным участником и призером ВДНХ, где экспонировались новые технические разработки. Нужно отметить, что разработки технологии и конструкции полупроводниковых приборов на основе соединений $A^{III}B^V$ были отражены более чем в 80 авторских свидетельствах, а Б.В. Царенков, А.Н. Именков и Ю.П. Яковлев удостоены почетного знака „Заслуженный изобретатель СССР“.

Школа Д.Н. Наследова поставила Советский Союз в число передовых держав по освоению новых материалов. Доклады Д.Н. Наследова по $A^{III}B^V$ на меж-



Рис. 4. Д.Н. Наследов и Ю.М. Бурдуков за установкой по выращиванию GaAs по методу Чохральского (1969 г.).

дународных конференциях вызвали большой интерес и признание. Заслуги Д.Н. Наследова в открытии и исследовании полупроводников $A^{III}B^V$ были отмечены за рубежом избранием его в 1968 г. член-корреспондентом Академии наук и литературы в г. Майнце (ФРГ) и членом Французского физико-химического общества.

В 70-е годы наряду с расширением тематики лаборатории разрабатываются новые методики исследования. Лаборатория Д.Н. Наследова быстро реагирует на огромный практический интерес в мире к примесям кислорода и железа в соединениях $A^{III}B^V$, позволяющим получать полужолирующие кристаллы арсенида галлия. Творческий коллектив, возглавляемый Д.Н. Наследовым, в кратчайший срок входит в число признанных ведущих коллективов мира, занимающихся этой проблемой. Здесь Дмитрий Николаевич объединяет научные силы возглавляемой им лаборатории в Физтехе и кафедры экспериментальной физики Ленинградского политехнического института (В.Ф. Мастеров). Это позволило расширить круг используемых методик и с их применением всесторонне и углубленно исследовать центры, образующие глубокие уровни, сначала в GaAs, а потом и в других соединениях $A^{III}B^V$ [34]. Именно тогда были выявлены и изучены ферромагнитные свойства кристаллов GaAs, легированных железом.

Возвращаясь к трудам лаборатории профессора Д.Н. Наследова, мы можем теперь отметить, что

1960–1970 гг. были плодотворными годами для научного становления сотрудников. Дмитрий Николаевич пускает их в „свободное плавание“, считая, что самореализация есть лучший способ мобилизации творческой энергии. Накопленный потенциал дал богатейшие результаты, пополнявшие мировую науку и технику полупроводников $A^{III}B^V$ в самых разных областях. Именно в это время лаборатория становится настоящей кузницей кадров: в ней работают десятки аспирантов и сотрудников со всех концов Советского Союза: от Новосибирска до Кишинева, от Баку до Вильнюса, от Ташкента и Ашхабада до Владикавказа. Были созданы научные школы в Северной Осетии, Молдове, Азербайджане, возглавляемые учениками Д.Н. Наследова (Н.В. Сиукаев, зав. кафедрой Северо-Осетинского государственного университета; Г.Б. Абдуллаев, президент АН Азербайджанской ССР; С.И. Радауцан, академик АН Молдавской ССР и др.). Сотрудники лаборатории, пришедшие в годы ее зарождения со студенческой скамьи, вырастают в самостоятельных исследователей, известных своим вкладом в дело исследования соединений $A^{III}B^V$.

В эти же годы были выполнены исследования по повышению квантового выхода фотоэффекта в $p-n$ -структурах на основе узкозонных полупроводников InAs и InSb при разогреве электронов высокоэнергетическими фотонами (А.А. Гуткин, А.В. Волков, М.П. Михайлова, С.Е. Кумекон) [35,36], а также проведены первые эксперименты по изучению процессов лавинного умножения в $p-n$ -структурах на InAs (М.П. Михайлова, Н.Н. Смирнова, С.В. Слободчиков) [37].

На юбилейных торжествах в 1968 г., посвященных 50-летию Физтеха, Ж.И. Алфёров отмечал решающую, пионерскую роль лаборатории Д.Н. Наследова в освоении и изучении $A^{III}B^V$, их техническом применении, в создании первых полупроводниковых лазеров и в развитии оптоэлектроники: „Вслед за открытием полупроводниковых свойств $A^{III}B^V$ сотрудниками ФТИ проделана большая работа по систематическому изучению явлений, связанных с протеканием электрического тока в этих соединениях. Закономерным следствием этого факта явилось создание физических предпосылок для разработки инжекционного полупроводникового лазера и целого семейства других полупроводниковых приборов на основе соединений $A^{III}B^V$ именно в ФТИ. Основная заслуга в этом принадлежит Д.Н. Наследову и его сотрудникам“ [3].

Таким образом, уже в 1950–1975 гг. в ФТИ были заложены основные направления отечественной полупроводниковой электроники и оптоэлектроники на основе полупроводников $A^{III}B^V$. Дальнейшее развитие фундаментальных исследований полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и научных традиций, predeterminedенных Д.Н. Наследовым, нашли свое продолжение и в работах других лабораторий Физико-технического института. В своих воспоминаниях, опубликованных в сборнике, посвященном 100-летию со дня рождения Д.Н. Наследова, Ж.И. Алфёров также заметил: „С первых дней начатых

мною в 1963 г. исследований гетероструктур я ощущал его (Д.Н.) помощь и поддержку, хотя эти работы быстро стали составлять конкуренцию исследованиям, проводимым в его лаборатории“ [2].

2. Эра гетеропереходов

Создание в 1963–1965 гг. Ж.И. Алфёровым с сотрудниками (Д.Н. Третьяков, Д.З. Гарбузов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Е.Л. Портной) гетеропереходов в результате контакта двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны позволило по-новому подойти к конструированию полупроводниковых приборов: лазеров, светодиодов, фотодетекторов, солнечных элементов и др. [38,39]. Основные преимущества гетеропереходов перед обычными гомопереходами заключались в возможности получения более широких спектральных характеристик оптоэлектронных приборов. Начинается эра гетеропереходов. Контакт двух соединений — широкозонного и узкозонного (рис. 5) — обеспечивает электронное ограничение и получение односторонней инжекции носителей заряда, оптическое ограничение и наличие широкозонного окна для ввода/вывода излучения, диагональное туннелирование через гетерограницу [38]. Д.Н. Третьякову удалось методом жидкофазной эпитаксии получить совершенные гетероструктуры I типа GaAs/AlGaAs, согласованные по параметру кристаллической решетки (рис. 5, *a*). На основе двойной гетероструктуры I типа GaAs/AlGaAs/GaAs Ж.И. Алфёров с сотрудниками создали первый полупроводниковый лазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре, опередив конкурентов из фирмы IBM (США). Теория такого лазера была разработана Р.Ф. Казариновым [40]. За создание полупроводникового лазера Ж.И. Алфёров и его команда были удостоены Ленинской премии в 1972 г. В 2000 г. Ж.И. Алфёрову совместно с Г. Кремером и Дж. Филби была присуждена Нобелевская премия по физике за развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной оптоэлектроники [39].

В 1975 г. преемником Д.Н. Наследова в лаборатории электронных полупроводников ФТИ становится молодой талантливый физик, доктор физ.-мат. наук, лауреат Ленинской премии Александр Александрович Рогачев. А.А. Рогачев сочетал в себе талант экспериментатора и физика-теоретика, его научный кругозор был очень широк, а результаты его исследований принадлежат разным областям физики полупроводников: полупроводниковые лазеры, конденсация экситонов и электронно-дырочная жидкость, многоэлектронные явления. Под его руководством в лаборатории электронных полупроводников возникает стойкий интерес к изучению гетеропереходов, главным образом на основе узкозонных полупроводников InAs, InSb, GaSb и их твердых растворов, перспективных для создания приборов среднего инфракрасного диапазона. К тому времени в лаборатории работало около 50 сотрудников, среди них свыше 20 кандидатов физ.-мат. наук (см. фото, рис. 6).

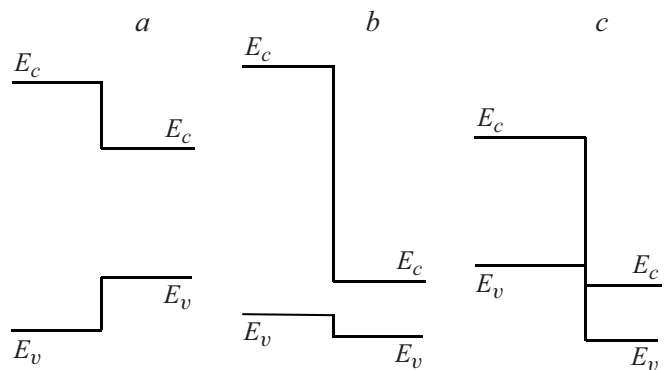


Рис. 5. Типы гетеропереходов: *a* — гетеропереход I рода (AlSb/GaSb); *b* — гетеропереход II рода, ступенчатый (AlSb/InAs); *c* — гетеропереход II рода, разъединенный (GaSb/InAs).

Наряде с фундаментальными исследованиями разрабатываются новые оптоэлектронные приборы на основе имеющейся уже технологии ЖФЭ. Так, в 1977–1980 гг. по постановлению Совета министров СССР были созданы и исследованы эффективные фотоприемники среднего ИК диапазона двух типов: умеренно-охлаждаемые на основе арсенида индия и неохлаждаемые фотоматричные приемники на основе антимонида индия для стационарных пирометрических преобразователей, используемых в автоматических системах управления технологическими процессами. После проведения соответствующих опытно-конструкторских работ прототипы данных приборов были переданы в 1978 и 1979 гг. на завод „Сапфир“ (г. Москва) и НПО „Термоприбор“ (г. Львов). Кроме того, технология создания неохлаждаемых фотодетекторов на основе InAs (С.В. Слободчиков, М.П. Михайлова, Ю.С. Сметанникова, Г.Н. Талалакин) была передана для освоения в НИИ Прикладной физики (ныне ГНЦ РФ АО «НПО „Орион“») [32,33].

В 80-е гг. с началом разработки и реализации волоконно-оптических линий связи на основе кварцевых волокон для спектрального диапазона 1.3–1.5 мкм и появлением эффективных полупроводниковых лазеров в мире возникает необходимость создания быстродействующих фотодиодов с низким уровнем избыточных шумов. Для приема лазерного излучения в системах телекоммуникаций до этого времени использовались лавинные фотодиоды и фототранзисторы на основе Ge и Si [41,42]. Было показано, что продвижение прозрачности волокон в длинноволновый диапазон (> 2 мкм) позволит снизить оптические потери на 2 порядка. Появились первые сообщения о создании таких волокон на основе флюоридных и халькогенидных стекол для III поколения ВОЛС [43,44]. Это стимулировало работы по созданию в ФТИ длинноволновых инфракрасных лавинных диодов и исследованию процессов ударной ионизации в полупроводниках $A^{III}B^V$ и их твердых растворах для диапазона 2–4 мкм [45–49].



Рис. 6. Лаборатория электронных полупроводников: 1 ряд снизу (слева направо) — А.Н. Баранов, В.Н. Бессолов, Г.С. Криво-ручкина, А.А. Рогачев (зав. лаб.), М.И. Михеева, Н.И. Саблина, А.С. Филипченко; 2 ряд снизу (слева направо) — В.В. Евстропов, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, Т.И. Воронина, Н.В. Зотова, Ю.Н. Ломасов, Н.Н. Смирнова, Т.С. Лагунова, Г.М. Филаретова, И.Н. Тимченко; 3 ряд снизу (слева направо) — А.А. Бакун, К.Н. Ельцов, И. Петрович, В.Е. Харчиев, Н.М. Колчанова, В.Н. Шелонин, Т.Г. Плугина, Е.М. Юревич, Ю.С. Сметаникова, Ю.П. Яковлев, В.Е. Седов; 4 ряд снизу (слева направо) — В.А. Смирнов, В.М. Асинин, С.А. Обухов, В. Степанов, А.В. Пенцов, В.П. Чернов, Н.А. Рудь; верхний ряд (слева направо) — А.А. Гуткин, А. Герасимов, А.А. Кузнецов, Н.М. Стусь, М. Аширов, Т.В. Львова, Г.Н. Талалакин, Е.И. Чайкина, Ю.А. Гольдберг, Т.Н. Данилова.

В работе М.П. Михайловой, А.А. Рогачева, И.Н. Яссиевич [45] впервые было установлено, что в материалах типа InAs и GaSb, в которых ширина запрещенной зоны (E_g) близка к величине спин-орбитального расщепления валентной зоны (Δ), достигается так называемый „резонанс“ зон, когда порог ударной ионизации минимален и равен энергии ширины запрещенной зоны, при этом ионизация осуществляется дырками из спин-орбитально отщепленной зоны. Детальные исследования коэффициентов ионизации в InAs, GaSb, AlSb и их твердых растворах были проведены в 1976–1984 гг. в работах М.П. Михайловой, И.А. Андреева, В.И. Королькова, М.З. Жингарева и подробно описаны в обзорах [46–48]. Теоретически и экспериментально была показана возможность управления отношением коэффициентов ионизации путем изменения зонной структуры, температуры, а также состава и ориентации рабочей поверхности эпитаксиальных слоев твердых растворов. Теоретические работы И.Н. Яссиевич и А.П. Дмитриева по расчету функции распределения горячих носителей и процессов ударной ионизации электронами и дырками

в сильных электрических полях привели к пониманию особенностей ударной ионизации в полупроводниках $A^{III}B^V$ и показали возможность достижения асимметрии коэффициентов ионизации в зависимости от особенностей зонной структуры. Эти работы в сочетании с проведенными экспериментальными исследованиями коэффициентов ударной ионизации обширного класса полупроводников (InAs, InAsSb, GaSb, GaInSb, GaAsSb, GaAlSb, InGaAs, InGaAsP) заложили основы создания малошумящих лавинных фотодиодов (APD) с большим отношением коэффициентов ионизации дырок и электронов. Первые лавинные фотодиоды для среднего ИК диапазона на основе такого подхода были созданы и продемонстрированы в 1975–1980 гг. Отметим, что приоритет данных работ заслужил международное и отечественное признание [32,33,42]. Впервые была разработана технология создания быстродействующих низкошумящих лавинных фотодиодов для области спектра 1.6–2.4 мкм на основе гетероструктур с разделенными областями поглощения (GaInAsSb) и умножения (область сильного поля в $p-n$ -переходе $Al_xGa_{1-x}Sb$ „резо-

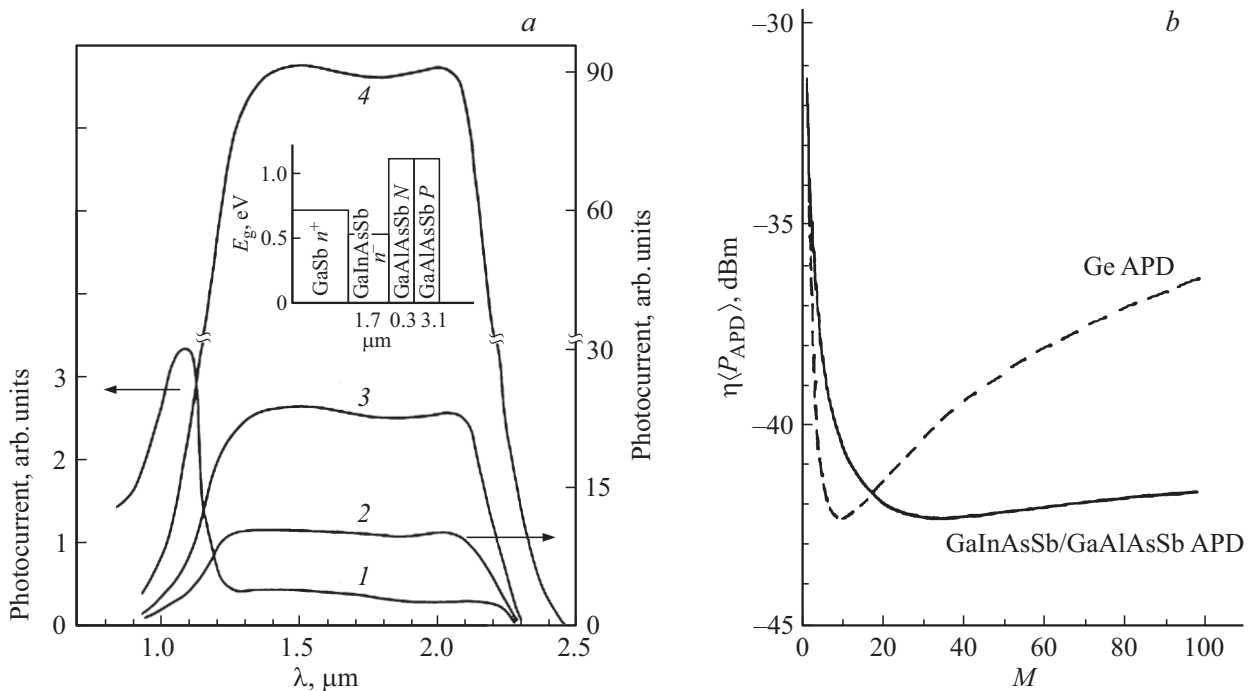


Рис. 7. *a* — спектры фототока лавинного фотодиода с разделенными областями поглощения (GaInAsSb) и умножения (p - n -GaAl(As)Sb) в зависимости от обратного смещения V , В: 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 20. *b* — порог оптического модуля на основе лавинного фотодиода GaInAsSb/AlGa(As)Sb в сравнении с модулем на основе лавинного фотодиода на Ge [59].

нансного состава^а, $x = 0.04$ – 0.06 , при этом соотношение $\Delta/E_g \approx 1.04$). В этих приборах был достигнут коэффициент умножения $M = 20$ – 30 на длине волны $2 \mu\text{m}$, отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов $\beta/\alpha \approx 30$ и сверхнизкий коэффициент избыточного шума $F \approx 1.6$ (при $M = 10$). Производство коэффициента усиления на ширину полосы пропускания составило $MB = 50$ – 60 ГГц. Впервые была показана возможность создания быстродействующего оптического модуля с лавинным фотодиодом на основе GaSb/GaAlAsSb (рис. 7). Оптический модуль был испытан в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова для детектирования оптических импульсов от твердотельных лазеров PLF:Ho (длина волны $\lambda = 2.06 \mu\text{m}$), YAG-Cr,Tm:Ho (длина волны $\lambda = 2.09 \mu\text{m}$) и показал минимальную пороговую чувствительность. Этот модуль был испытан также для работы ВОЛС на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ при скоростях передачи информации 0.5 – 1.0 Гбит/с и при пороговой чувствительности $\eta(P_{\text{APD}} = -42.3 \text{ dB} \cdot \text{M})$ при $M = 34$ – 39 , которая превосходила значения для аналогичного модуля с лавинным Ge-фотодиодом [49]. Такие лавинные диоды перспективны для лазерной дальнометрии и локации в сберегающем глаз спектральном диапазоне, гетеродинного детектирования в системах телекоммуникаций III поколения на длинноволновых волокнах с низкими потерями, информационных технологий. В 1982 г. готовилась передача технологии получения гетероструктур для лавинных фотодиодов на основе соединений InAs и GaSb в НПО „Орион“, однако развал

электронной промышленности СССР в 90-е гг. помешал реализации этого проекта.

2.1. Исследование ступенчатых гетеропереходов II типа

В своем обзоре [38], посвященном истории и будущему полупроводниковых гетероструктур, и в Нобелевской лекции [39] Ж.И. Алфёров писал о перспективах гетеропереходов II типа (рис. 5, *b*): „Реализация инжекционного лазера на основе гетеропереходов II-го рода в системе GaInAsSb–GaSb открыла хорошие перспективы для создания эффективных когерентных источников света в инфракрасном оптическом диапазоне. Излучение в структурах такого типа возникает за счет рекомбинации электронов и дырок, локализованных в самосогласованных потенциальных ямах, расположенных по разные стороны от гетерограницы. Таким образом, гетероструктуры II-го рода открывают новые возможности как в фундаментальных исследованиях, так и для приборных применений, реализация которых на гетероструктурах I-го рода в системе соединений $A^{III}B^V$ невозможна. Однако практическое использование гетероструктур II-го рода до сих пор лимитируется недостаточным пониманием их фундаментальных свойств и ограниченным числом экспериментально исследованных систем“. Представленные в настоящей статье результаты проведенных в ФТИ детальных исследований оптических, магнитотранспортных, фотоэлектрических

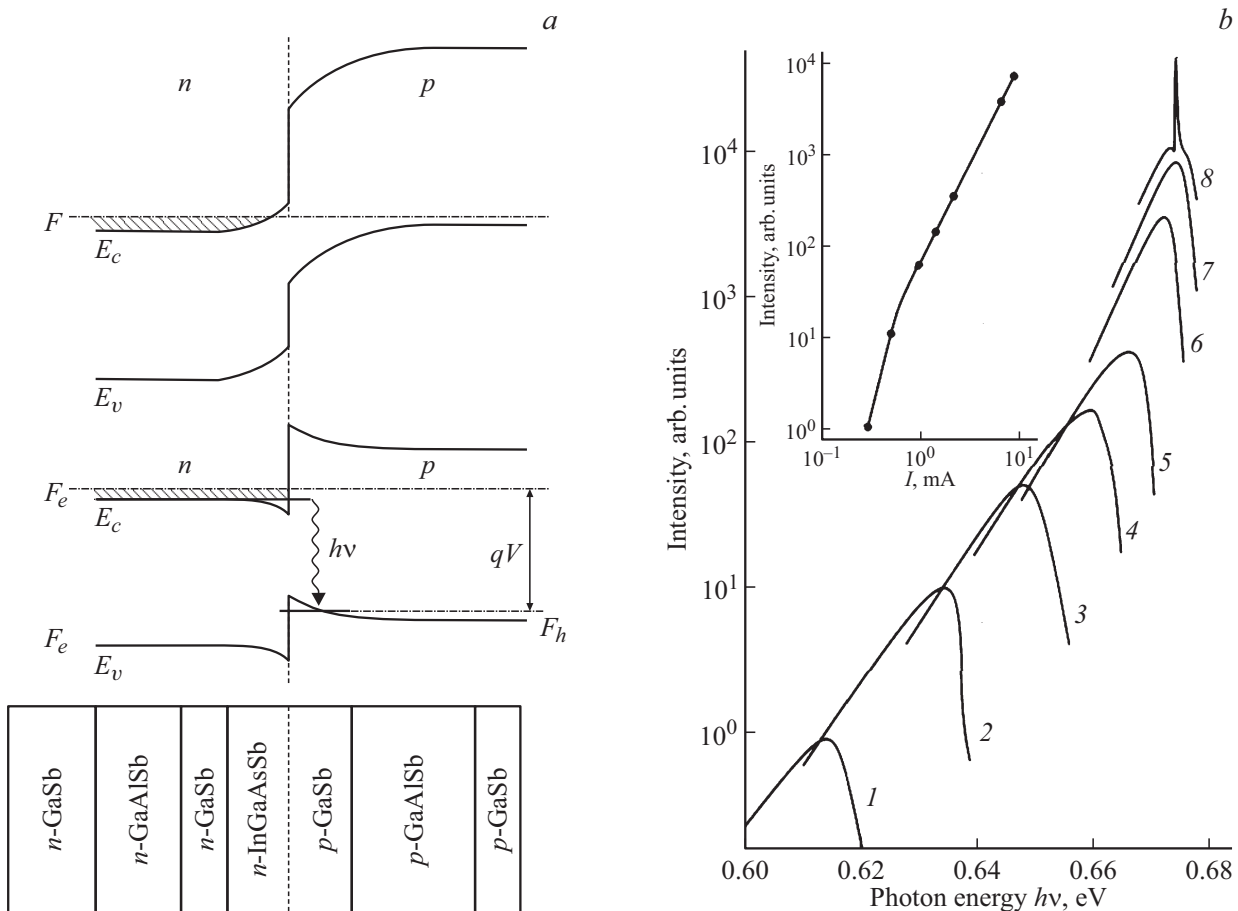


Рис. 8. Лазер на основе ступенчатого гетероперехода II типа в системе GaSb–GaInAsSb [42]. *a* — энергетическая диаграмма и схема структуры; *b* — спектры спонтанного и когерентного излучения при 4.2 К лазерной структуры с разьединенным гетеропереходом II типа в активной области в зависимости от тока накачки I , мА: 1 — 0.3, 2 — 0.6, 3 — 1, 4 — 2, 5 — 3, 6 — 10, 7 — 13, 8 — 15.

свойств гетеропереходов II типа, как ступенчатых, так и разьединенных, и создание на их основе лазеров, светодиодов, фотодетекторов, лавинных фотодиодов для среднего ИК диапазона в значительной степени восполняют этот пробел. Новые физические явления, рассмотренные в представленных здесь работах, имеют чрезвычайно важное значение для понимания процессов, происходящих в новых низкоразмерных полупроводниковых структурах с гетерограницей II типа, в том числе наноструктурах с квантовыми точками и квантовыми проволоками.

Наибольший интерес исследователей привлекают гетеропереходы II типа со ступенчатой структурой зон, в которых скачки потенциала на гетерогранице направлены в одну сторону (рис. 5, *b, c*). Фундаментальными свойствами гетеропереходов II типа являются пространственное разделение электронов и дырок на гетерогранице и их локализация в самосогласованных квантовых ямах на интерфейсе. Как впервые показали в 1983 г. Г. Кремер и Г. Гриффитс [50], в такой системе может возникать туннельная излучательная рекомбинация через гетерограницу с энергией излучения меньше ши-

рины запрещенной зоны узкозонного полупроводника, что позволяет управлять оптическими свойствами таких гетероструктур в широких пределах. Экспериментальное первое подтверждение этого эффекта было получено в работе [51] при исследовании фотолюминесценции гетероперехода II типа AlInAs/InP.

В 1985 г. в ФТИ в лаборатории А.А. Рогачева был создан первый инфракрасный полупроводниковый лазер на основе гетероперехода II типа GaInAsSb/GaSb [52], выращенного методом ЖФЭ, работающий с низким порогом в диапазоне длин волн 1.7–2.4 мкм в широком интервале температур 4.2–300 К (рис. 8). Оригинальная технология была разработана А.Н. Барановым и Ю.П. Яковлевым. Специфические особенности такого лазера, связанные с преимуществом использования гетероперехода II типа с самосогласованными квантовыми ямами на гетерогранице, были объяснены А.А. Рогачевым туннельными (неинжекционными) переходами локализованных носителей заряда и их рекомбинацией вблизи гетерограницы. Практическое использование таких лазеров требовало применения новых современных эпитаксиальных технологий. В 1989 г. П.С. Копьевым,

А.М. Монаховым, Н.Н. Леденцовым и А.А. Рогачевым была предложена конструкция „неинжекционного лазерного диода“ на основе квантово-размерной гетероструктуры II типа с глубокой дельтаобразной ямой [53]. Позже прототип такого лазера был выращен методом молекулярно-пучковой эпитаксии А.Н. Барановым в Университете Монпелье-2 (Франция).

Характерные особенности гетеропереходов II типа определяют их оптические, транспортные и фотоэлектрические свойства по сравнению с гетеропереходами I типа, а также влияют на параметры приборов на их основе. Уникальные свойства таких гетероструктур вызывают большой интерес и начинают исследоваться как в ФТИ, так и во многих зарубежных лабораториях [54–57]. В лаборатории А.А. Рогачева были исследованы фотолюминесцентные, электролюминесцентные, электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов II типа в системе GaSb–InAs, как ступенчатых, так и разьединенных, определены их зонные энергетические диаграммы [54]. Было достигнуто понимание физических процессов, происходящих на гетерогранице II типа, и обнаружены новые физические явления. Впервые наблюдалась интенсивная длинноволновая полоса фото- и электролюминесценции в структурах p -GaInAsSb/ p -GaSb, обусловленная интерфейсными рекомбинационными переходами электронов, локализованных в квантовой яме на гетерогранице со стороны узкозонного материала. Нужно отметить, что из-за асимметрии гетерограницы II типа n - p -переход не эквивалентен p - n -переходу, поскольку в данных гетеропереходах узкозонный и широкозонный слои имеют разные типы проводимости, что важно учитывать при конструировании приборов на их основе. В таких гетероструктурах было установлено, что рекомбинация носителей заряда на гетерогранице II типа вносит значительный вклад в спектр спонтанной люминесценции светодиодов на основе гетеропереходов N - n - P и N - p - P (GaSb/GaInAsSb/GaSb). При этом наблюдался различный характер поляризации полос излучения, приписанных различным механизмам (объемный или интерфейсный) излучательной рекомбинации [58].

При изучении фотоэлектрических свойств изотипной гетероструктуры N -GaSb/ n -Ga $_{1-x}$ In $_x$ As $_y$ Sb $_{1-y}$ ($x = 0.18$ – 0.20) был обнаружен новый механизм усиления фототока, связанный с модуляцией прозрачности барьера на интерфейсе и обусловленный туннельным переходом электронов из зоны проводимости GaSb, и локализацией фотоиндуцированных дырок в потенциальной яме на стороне GaInAsSb вблизи гетерограницы II типа. В двухслойных (N - n) и трехслойных (N - n - N) гетероструктурах наблюдалось усиление фототока до 10^2 – 10^3 в температурном интервале 77–300 К [59]. Поскольку механизм фотоэлектрического усиления в этих структурах беспороговый, большое усиление может быть достигнуто при достаточно малых прямых и обратных смещениях (< 100 мВ). Помимо практического использования таких изотипных гетероструктур в качестве фотоприемников среднего ИК диапазона (2–3 мкм), они

могут представлять интерес как элементы нелинейной оптики. Отметим, что эта работа проводилась в тесном взаимодействии с НПО „Электрон“.

2.2. Исследование разьединенных гетеропереходов II типа

Наиболее интересными и необычными свойствами обладают гетеропереходы II типа с так называемой разьединенной (broken-gap, misaligned) структурой энергетических зон (рис. 5, *c*). В работах Л. Езаки с сотрудниками было показано, что гетеропереходы II типа GaSb/InAs и их твердые растворы могут образовывать разьединенные гетеропереходы благодаря тому, что из-за большого различия значений электронного сродства потолок валентной зоны GaSb лежит по энергии выше дна зоны проводимости InAs. При этом разрыв зон на гетерогранице составляет ~ 120 мэВ при комнатной температуре [60].

В лаборатории электронных полупроводников впервые были экспериментально исследованы уникальные свойства разьединенных гетеропереходов в системе твердых растворов GaInAsSb, изопериодных с подложками InAs, GaSb, и установлены их зонные энергетические диаграммы (М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова) [54,61–63]. При изучении электрических и фотоэлектрических свойств N - p -, N - n - и P - p -гетеропереходов на основе гетероструктур GaInAsSb/InAs(GaSb) было обнаружено, что их вольт-амперные характеристики (ВАХ) являются выпрямляющими, тогда как ВАХ P - n -гетероперехода свидетельствовала об омическом поведении с наклоном, соответствующим величине сопротивления ~ 1 Ом, в широком диапазоне температур (4.2–300 К) и токов, что характеризует исследуемую структуру как разьединенный гетеропереход II типа. Были оценены разрывы зон проводимости и валентной на гетерогранице II типа GaInAsSb/InAs ($\Delta E_c = 0.80$ эВ, $\Delta E_v = 0.34$ эВ), и перекрытие энергетических зон на интерфейсе составило 40–80 мэВ. Интересно отметить, что для „выпрямляющих“ гетероструктур на разьединенной гетерогранице II типа формируются большие изгибы зон, а область объемного заряда лежит главным образом либо в широкозонном материале (N - n , N - p), либо в узкозонном (P - p). Такие гетеропереходы аналогичны диодам Шоттки, в которых роль металлического контакта играет либо широкозонный материал, либо узкозонный. Эти характерные особенности разьединенных гетероструктур необходимо учитывать при конструировании светоизлучающих и фотоэлектрических приборов. Экстраординарные свойства разьединенных переходов подтверждают спектры fotocувствительности трех данных гетероструктур. Как и ожидалось, максимумы fotocувствительности для N - n - и N - p -гетероструктур лежат в коротковолновой области спектра, а спектр P - p -гетероструктуры сдвинут в длинноволновую область [61,62]. На примере системы GaInAsSb/InAs(GaSb)

были детально изучены условия перехода от ступенчатого гетероперехода к разъединенному в зависимости от состава твердых растворов и температуры [63], согласующиеся с результатами теоретической работы [64].

Наиболее интригующим фактом было обнаружение двумерного полуметаллического канала с высокой электронной подвижностью $50000\text{--}80000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в изотипной гетероструктуре $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p\text{-InAs}$ ($x = 0.04\text{--}0.16$) [65]. Для проведения данных исследований К.Д. Моисеевым были получены методом ЖФЭ уникальные гетероструктуры с резкой планарной границей раздела между двумя полупроводниками шириной в 3–4 монослоя ($10\text{--}12\text{ \AA}$) [66]. Магнитотранспортные и оптические свойства двумерного (2D) электронного канала были изучены в широком диапазоне магнитных полей (до 35 Тл) при низких и сверхнизких температурах, 1.5–10 К [67–69]. Эксперименты по магнитофотолюминесценции и циклотронному резонансу позволили оценить эффективные массы 2D носителей заряда для трех подзон размерного квантования в полуметаллическом канале. Были установлены условия перехода от полуметаллической проводимости к полупроводниковой, и наблюдалось истощение электронного канала в зависимости от состава и уровня легирования четверного твердого раствора GaInAsSb. В слабых магнитных полях (0–2 Тл) в гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$, выращенных на подложках, сильно легированных марганцем ($p > 5 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$), наблюдались аномальный эффект Холла (АЭХ) и отрицательное магнитосопротивление [63]. Такие материалы могут обладать ферромагнитными свойствами и быть интересными для получения полупроводников с высокой температурой Кюри, перспективных для приложений в спинтронике и для магнитных сенсоров.

При изучении планарного квантового магнитотранспорта (в сильных магнитных полях, 12–35 Тл) в одиночных гетероструктурах $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$, которое проводилось совместно с лабораторией кинетических явлений в твердых телах при низких температурах (Р.В. Парфеньев, В.А. Березовец), удалось наблюдать плато целочисленного эффекта Холла для электронов в присутствии дырочной подсистемы (рис. 9) [70]. При этом при достижении плато квантового Холла, кратного h/e^2 , с увеличением внешнего магнитного поля была зафиксирована смена знака для холловского сопротивления с электронного на дырочный, что указывало на переход в диэлектрическое состояние в полуметаллическом канале на гетерогранице II типа. Результаты исследования вертикального квантового магнитотранспорта и спин-зависимых явлений показали существование энергетической щели в туннельной плотности состояний (диэлектрическое состояние) при нахождении уровня Ферми между наинизшими уровнями Ландау 2D электронной системы [70–72]. Выход из диэлектрического состояния происходил резонансным образом при совпадении уровня Ферми с уровнями Ландау, и величина

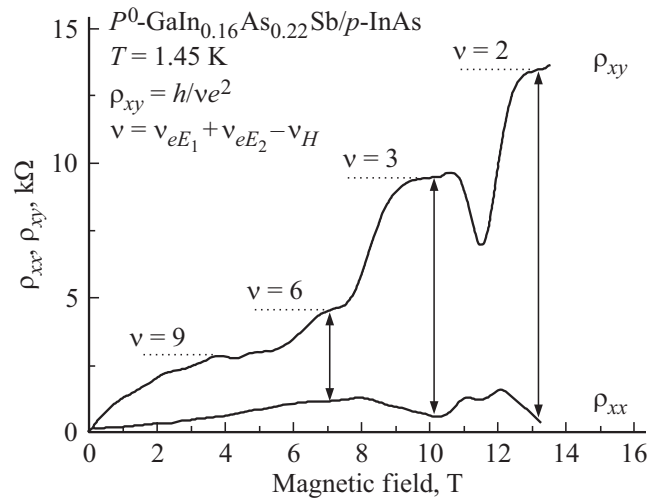


Рис. 9. Квантовый эффект Холла (КЭХ) в одиночном гетеропереходе II типа $p\text{-GaIn}_{0.16}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$ при $T = 1.45\text{ К}$. Стрелками показаны плато квантового эффекта Холла.

ступенек ВАХ зависела от направления спина ближайшего уровня Ландау. Эти работы в известном смысле предвосхитили проводимые в последние десятилетия исследования магнитных и топологических свойств и особенностей поведения 2D полупроводниковых гетероструктур с полуметаллической (инвертируемой) зонной структурой на основе системы InAs–GaSb [73,74].

В одиночной разъединенной гетероструктуре II типа $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ обнаружена и изучена интенсивная интерфейсная электролюминесценция с энергией фотона меньше энергии запрещенной зоны соединений, формирующих гетеропереход, обусловленная резонансным туннелированием электронов из квантовой ямы на гетерогранице на стороне $p\text{-InAs}$ с их последующей рекомбинацией с дырками, локализованными на стороне твердого раствора [67]. Понимание необычного поведения носителей на гетерогранице II типа стимулировало создание целого класса новых оптоэлектронных приборов для среднего ИК диапазона. Так, был предложен и впервые реализован туннельно-инжекционный лазер с одиночным разъединенным гетеропереходом II типа в активной области (рис. 10, а) [75]. Большие разрывы зон на гетерогранице обеспечили электронное ограничение и удержание носителей заряда в активной области лазера, тогда как основным механизмом излучательной рекомбинации стали туннельные переходы электронов и дырок через квантовые состояния на гетерогранице II типа. При этом стимулированное излучение возникало на высокоэнергетическом крае полосы спонтанного излучения (рис. 10, б). Низкий пороговый ток был достигнут за счет подавления безызлучательной оже-рекомбинации для данных рекомбинационных переходов. В 2005 г. цикл работ по созданию и исследованию оптических и магнитооптических свойств гетеропереходов II типа в системе GaSb–InAs и реализации их в приборах был

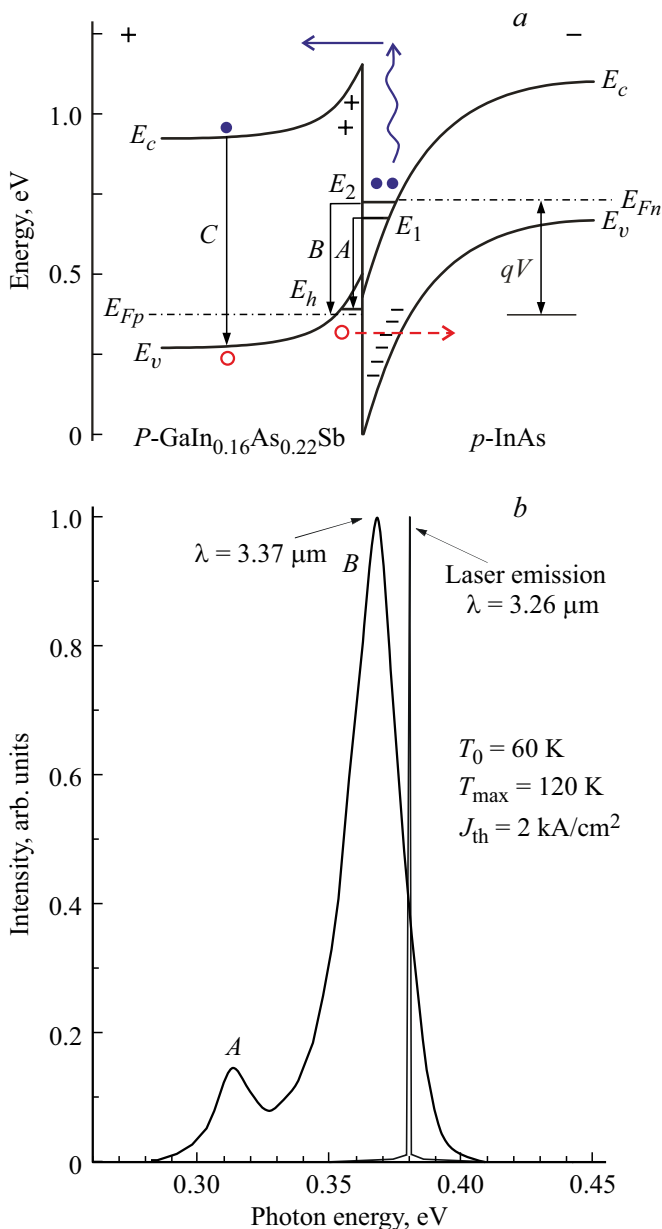


Рис. 10. *a* — излучательные рекомбинационные переходы вблизи одиночной разьединенной гетерограницы II типа $P\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ при приложении внешнего смещения; *b* — излучение туннельно-инжекционного лазера с разьединенным гетеропереходом $P\text{-GaInAsSb}/p\text{-InGaAsSb}$ в активной области [75].

удостоен именной премии А.Ф. Иоффе ФТИ (М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Н. Титков, Р.В. Парфеньев, Ю.П. Яковлев). Эти исследования легли также в основу создания целой серии инфракрасных светодиодов, лазеров и фотодиодов для средней ИК области спектра 1.5–4.5 мкм [75,76] с разьединенным гетеропереходом в активной области.

Рассмотренные исследования важны для создания светоизлучающих структур, лазеров и фотодетекторов на основе других полупроводниковых материалов, которые

могут образовывать гетеропереходы со ступенчатой или разьединенной структурой зон. В обзоре [77], посвященном изучению динамики носителей в гетеропереходах II типа и их рекомбинационным свойствам, приводится перечень таких материалов на основе полупроводников $A^{III}B^V$ (AlInAs/InP , $\text{InGaAs}/\text{GaAsSb}$, $\text{GaInAsSb}/\text{GaSb}$, GaAs/InP , InAs/GaSb и др.).

3. Инфракрасная оптоэлектроника

В 1995 г. в ФТИ на базе лаборатории электронных полупроводников была образована лаборатория инфракрасной оптоэлектроники под руководством доктора физ.-мат. наук Юрия Павловича Яковлева, ученика Д.Н. Наследова и Б.В. Царенкова. Сохраняется выбранное ранее направление по исследованию фундаментальных свойств полупроводников $A^{III}B^V$ и гетероструктур на их основе, при этом основное внимание уделяется разработке технологии выращивания многокомпонентных твердых растворов и формированию гетероструктур на основе узкозонных материалов (InSb , InAs , GaSb) методами ЖФЭ и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), а также созданию и исследованию оптоэлектронных приборов (лазеров, светодиодов и быстродействующих фотодиодов) для среднего ИК диапазона (1.6–5 мкм). Этот диапазон важен в первую очередь для экологического мониторинга и охраны окружающей среды, поскольку в этом диапазоне лежат полосы поглощения основных природных и промышленных газов (H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , NO_2 , H_2S и др.), а также горючих и взрывчатых веществ. Кроме того, оптоэлектронные сенсоры востребованы для ряда медицинских применений (контроль выдыхаемой смеси, контроль анестетиков, неинвазивная диагностика содержания глюкозы в крови и др.).

На основе пионерских исследований гетероструктур в системах $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$, $\text{GaInAsSb}/\text{InAs}(\text{GaSb})$, $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$, $\text{InAs}/\text{InAlAsSb}$ были созданы высокоэффективные светодиоды для областей спектра 1.6–2.4 и 3.0–4.8 мкм [78–80]. Были разработаны длинноволновые широкополосные фотодиоды на основе узкозонных соединений $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ для диапазона 2.5–4.8 мкм (В.В. Шерстнев, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев), работающие при комнатной температуре. Эти фотодиоды позволяют измерять с помощью одного прибора несколько полос поглощения таких веществ, как H_2O , NO_2 , CH_4 , CO_2 [81].

В узкозонных светоизлучающих структурах исследован эффект отрицательной люминесценции, обусловленный экстракцией носителей заряда из активной области структуры при обратном смещении [82]. Этот эффект, открытый в 1959 г. В.И. Ивановым-Омским и В.А. Смирновым, был использован Б.А. Матвеевым с сотрудниками для создания инфракрасных светодиодов на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ для нового поколения оптико-акустических анализаторов,

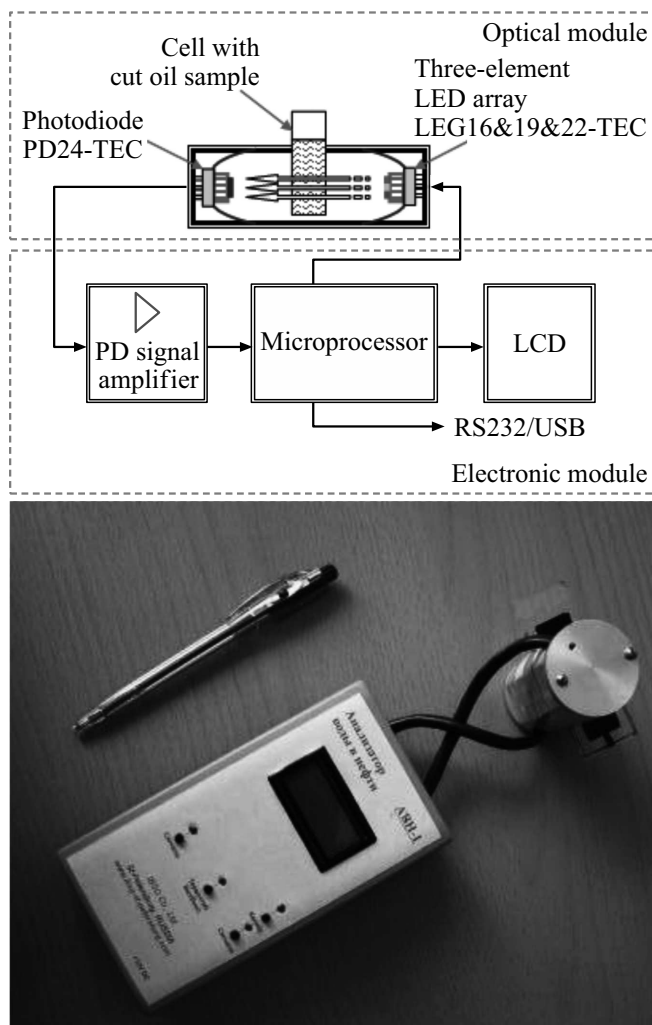


Рис. 11. Портативный оптический анализатор содержания воды в нефти на базе трех светодиодов и фотодиода в области спектра 1.5–2.5 мкм [89].

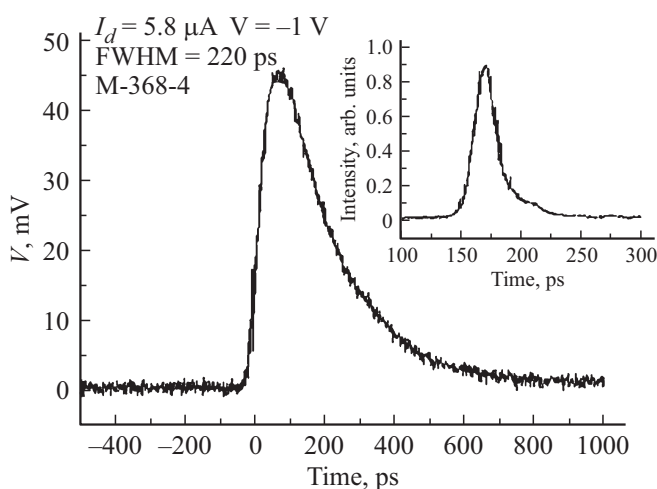


Рис. 12. Быстродействие $p-i-n$ -фотодиода GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb при воздействии лазерного импульса ($\lambda = 1.3$ мкм). На вставке — форма импульса лазера на основе InGaAsP/InP.

разрабатываемых совместно с зарубежными коллегами (проект MINIGAS при поддержке Евросоюза, 2008–2012 гг. [83]). Работа по обнаружению и исследованию отрицательной люминесценции и создание излучающих приборов на ее основе была удостоена премии им. В.Я. Френкеля (ФТИ) в 2007 г. (В.И. Иванов-Омский, В.А. Смирнов, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь). Эти исследования получили дальнейшее развитие при изучении оптических свойств асимметричных гетероструктур II типа с глубокими квантовыми ямами [84]. Так, в наногетероструктуре $p\text{-InAs/AlSb/InAsSb/AlSb}/p(n)\text{-GaSb}$, где квантовая яма AlSb/InAsSb/AlSb была вставлена в разьединенный гетеропереход II типа InAs/GaSb, наблюдалась высокая интенсивность отрицательной люминесценции в интервале длин волн 3–5 мкм, превышающая на 60% положительную люминесценцию в максимуме спектра излучения при $T > 300\text{--}380$ К.

В последние годы экспериментально и теоретически было исследовано явление „беспорогового“ усиления фототока/фотопроводимости при малых обратных смещениях в наногетероструктурах II типа $n\text{-GaSb/InAs}/p\text{-GaSb}$ с одиночной квантовой ямой, обусловленное эффектом туннелирования носителей заряда и фильтрацией эффективной массы через изотипную гетерограницу $n\text{-GaSb}/n\text{-InAs}$ [85]. Полученные результаты могут быть применены при создании твердотельного умножителя нового типа для волоконно-оптических линий связи, работающего в ближнем ИК диапазоне (1.2–1.6 мкм) с высоким усилением фототока, $G \geq 10^2\text{--}10^3$, при низком энергопотреблении. Совместно с ООО „Июffe ЛЕД“ и НПО „Электрон“ разработаны широкополосные флип-чип фотодиоды на основе двойной гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}/n\text{-InAsSbP}$, перспективные для создания малоформатных матриц для среднего ИК диапазона [86].

На основе спектрально-согласованных пар светодиод-фотодиод [87] был разработан целый ряд оптоэлектронных сенсоров: анализатор влажности бумаги [88], углекислого газа и метана [87], анализатор содержания воды в нефти [89] и сенсор водорода нового типа [90] на основе фотоэлектрического метода регистрации, предложенного С.В. Слободчиковым в 1991 г. Большинство разработок защищено авторскими свидетельствами и патентами. На рис. 11 представлена конструкция опытного образца портативного оптического анализатора воды в нефти на основе инфракрасной трехсветодиодной матрицы, излучающей в диапазоне 1.85–2.4 мкм. С помощью этого прибора были проведены тестовые испытания по определению содержания воды в сырой нефти типа „девон“ (Бирючевский ЦПС ОАО „Татнефть“, г. Бугульма) и получены хорошие результаты. Разработанный анализатор позволяет определять концентрацию воды в водно-нефтяной смеси в диапазоне от 0 до 80% с погрешностью 2–3% (совместная разработка лаборатории ИК оптоэлектроники и ООО „Аиби“).

Созданы инфракрасные фотодиоды на основе гетероструктур GaInAsSb/AlGaAsSb для спектрального диапа-

зона 1.6–2.4 мкм (рис. 12), обладающие высокой обнаружительной способностью, $D^* \geq 10^{11} \text{ см} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, и быстродействием $> 2\text{--}5 \text{ ГГц}$ (И.А. Андреев, М.П. Михайлова, Г.С. Соколовский), превосходящие по параметрам зарубежные аналоги, выпускаемые известными фирмами (Hamamatsu, Epitaxx, Sensor Ltd. и др.) [91–93]. Разработана технология легирования соединений антимонида галлия редкоземельными элементами с целью получения низкой концентрации примесей (до 10^{16} см^{-3}) в активной области фотодиодов на основе GaSb. Для снижения темновых токов и защиты боковой поверхности меза-структур была разработана оригинальная методика пассивации в сульфидных растворах NH_4S_2 , защищенная патентами (Т.В. Львова, Е.В. Куницына) [94].

За создание и исследование быстродействующих $p\text{--}i\text{--}n$ -фотодиодов и лавинных фотодиодов на основе узкозонных гетероструктур полупроводников $A^{III}B^V$ для среднего ИК диапазона сотрудники лаборатории и Центра наногетероструктур ФТИ были удостоены в 2012 г. именной премии им. В.М. Тучкевича (И.А. Андреев, М.П. Михайлова, И.Н. Ясневич, Н.Д. Ильинская, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев).

Новым перспективным шагом в создании лазеров на основе узкозонных полупроводников $A^{III}B^V$ для средней области ИК спектра (2–4 мкм) было предложение использовать конструкцию лазерной структуры в форме диска, работающую на модах шепчущей галереи. В общем понимании моды шепчущей галереи являются универсальными линейными возбуждениями дисковых и кольцевых резонаторов. Впервые они наблюдались в 1910 г. как звуковые волны, распространяющиеся вдоль наружной стены галереи для посетителей в круглом зале собора Св. Павла в Лондоне, и были исследованы лордом Рэлеем [95]. Придуманное для этого акустического явления название — моды шепчущей галереи (whispering gallery modes, WGM) — было использовано для обозначения собственных мод дисковых резонаторов. Известно, что в узкозонных полупроводниковых соединениях сильны (по сравнению с более широкозонными) процессы безызлучательной рекомбинации, что понижает коэффициент усиления в активной области лазера. Добротность дискового резонатора может превышать значение 10^6 , тогда как добротность резонатора Фабри–Перро составляет $\sim 3 \cdot 10^2$. Существенное увеличение добротности, обеспечиваемое дисковыми резонаторами, позволяет получить прибор, генерирующий излучение, даже когда оптическое усиление в активной области невелико.

Первые полупроводниковые WGM-лазеры среднего ИК диапазона (3–4 мкм) были созданы сотрудниками лаборатории ИК оптоэлектроники (ФТИ) В.В. Шершневым и А.М. Монаховым совместно с сотрудниками группы проф. А. Криера (Университет Ланкастера, Англия) на основе объемных двойных гетероструктур $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$, выращенных методом ЖФЭ [96]. Такие WGM-лазеры работали в непрерывном режиме вплоть до 150 К. Следующим

шагом было создание WGM-лазеров для диапазона 2.0–2.4 мкм на основе квантово-размерной наногетероструктуры $\text{GaAlAsSb}/\text{GaInAsSb}$ методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) совместно с сотрудниками группы проф. А.Н. Баранова (Университет Монпелье-2, Франция) [97]. Такие лазеры работали в непрерывном режиме уже при комнатной температуре. Одна из главных проблем дисковых лазеров — это вывод излучения за пределы резонатора. Поскольку добротность дискового лазера на 2–3 порядка превышает добротность лазера Фабри–Перро, когерентное излучение в основном сосредоточено в дисковом резонаторе и только малая часть покидает кристалл за счет рассеяния когерентного света на дефектах, локализованных на поверхности дискового резонатора. Для решения данной проблемы авторы предложили использовать WGM-лазеры с усеченным резонатором, что позволяет получать двухлучевые источники когерентного света (как однонаправленные, так и разнонаправленные), перспективные для создания портативных лазерных спектрометров.

Большое внимание в лаборатории ИК оптоэлектроники уделялось фундаментальным исследованиям низкоразмерных гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе узкозонных полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и гетероструктур II типа. Разработана технология получения наногетероструктур с самоорганизующимися квантовыми точками и квантовыми штрихами InSb в узкозонной матрице на основе многокомпонентных твердых растворов в системах $\text{In}\text{--}\text{As}\text{--}\text{Sb}\text{--}\text{P}$ и $\text{Ga}\text{--}\text{In}\text{--}\text{As}\text{--}\text{Sb}$ как методом ЖФЭ, так и методом МОГФЭ [98–100]. Плотность массивов полученных нанообъектов достигала 10^{10} см^{-2} . Были определены размеры полученных когерентных квантовых точек InSb, которые составляли 3–4 нм в высоту, 11–13 нм в диаметре, и впервые были получены вольт-амперные характеристики отдельно расположенной открытой квантовой точки InSb на поверхности бинарной матрицы InAs. Установлено, что при заданных технологических условиях наращивания наблюдается изменение геометрии наноостровков InSb в зависимости от химии поверхности матрицы. Разработана технология наращивания методом МОГФЭ эпитаксиальных слоев предельного состава многокомпонентных твердых растворов в системе $\text{In}\text{--}\text{As}\text{--}\text{Sb}\text{--}\text{P}$ при низких температурах роста ($< 520^\circ\text{C}$) в условиях атмосферного давления [101]. Присутствие общих катиона и аниона, как в матрице, так и в наращенном слое, влияет на формирование граней квантовых точек/штрихов плоскостями одного семейства. Изготовлены прототипы светоизлучающих приборов на основе гетероструктур с квантовыми штрихами InSb, помещенными в изотипную матрицу на основе соединений InAs, которые работали на длине волны 3.62 мкм при комнатной температуре [102]. Использование в активной области лазеров и светодиодов наногетероструктур с квантовыми точками и квантовыми штрихами на основе узкозонных антимонидных соединений, в которых носители заряда будут локализованы сильнее, чем в кван-

товой яме, позволит реализовать большее перекрытие волновых функций электронов и дырок, что приведет к увеличению коэффициента усиления при существенном подавлении инжекционных и безызлучательных потерь. Преимущество создания фотодетекторов на квантовых точках и квантовых штрихах заключается в достижении более низкого значения темнового тока благодаря трехмерному ограничению волновых функций электронов в матрице, что приводит к значительному увеличению времени жизни электронов и более высокой эффективности рекомбинации носителей.

Проводимые в ФТИ экспериментальные и теоретические исследования процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации, в особенности оже-рекомбинации, показали перспективность использования гетеропереходов II типа для создания оптоэлектронных приборов, в которых можно управлять энергией излучения с помощью изменения высоты потенциальных барьеров на гетерограницах, а также существенно подавлять оже-рекомбинацию [103,104]. Последний эффект обеспечивает более слабую температурную зависимость на гетерогранице II типа излучательных процессов в лазерах и светодиодах по сравнению с гетероструктурами I типа [105].

Впервые были обнаружены и экспериментально и теоретически исследованы суперлинейная электролюминесценция и степенное возрастание оптической мощности от тока накачки в спектральном диапазоне 2–3 мкм как в объемных гетероструктурах II типа с высокими потенциальными барьерами GaSb/InGaAsSb/AlGaAsSb [106], так и в наноструктурах с глубокими квантовыми ямами I типа Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb [107], выращенными методом МОГФЭ на подложке GaSb. Эти работы проводились в тесном сотрудничестве в лабораторией МОГФЭ (MOVPE Laboratory) Института физики Чешской АН (г. Прага). Установлено, что в обоих типах гетероструктур эффект суперлинейной люминесценции обусловлен схожими механизмами, а именно вкладом в излучательную рекомбинацию добавочных электронно-дырочных пар, создаваемых за счет ударной ионизации горячими электронами, разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости широкозонного барьера и первого электронного уровня (обратный оже-эффект). Полученные результаты были использованы для создания высокотемпературных светодиодов для средней ИК области, работающих в диапазоне 300–500 К (20–200°C) [108]. Данный эффект также может быть применен для повышения квантовой эффективности солнечных и термофотовольтаических элементов.

В последние годы проведены фундаментальные исследования по выявлению параметров инвертированной зонной структуры композитных квантовых ям на основе разведиленных гетеропереходов II типа AlSb/InAs/GaSb/AlSb, полученных методом МОГФЭ на подложках GaSb и InAs [109–111]. В таких композитных квантовых ямах были изучены поглощение микроволнового излучения методом электронного парамагнитного

резонанса (ЭПР) в магнитных полях до 1.4 Тл в интервале температур 2.7–270 К, а также вертикальный магнитотранспорт в сильных магнитных полях до 16 Тл при $T = 2.7–20$ К. Работа проводилась совместно с другими лабораториями ФТИ (М.П. Михайлова, К.В. Калинина — лаборатория инфракрасной оптоэлектроники; Р.В. Парфеньев, В.А. Березовец — лаборатория кинетических явлений в полупроводниках; А.И. Вейнгер, И.В. Кочман — лаборатория неравновесных процессов в полупроводниках). Полученные результаты важны для понимания особенностей квантовой кинетики двумерных электронов и дырок в гетеропереходах II типа с полуметаллической квантовой ямой. Исследование инвертированных квантовых ям на основе гетероструктур типа InAs/GaSb представляет также интерес для использования их в схемах микроволнового и терагерцового детектирования и спектроскопической техники, а также задач спинтроники.

В лаборатории квантово-размерных гетероструктур (П.С. Копьев, С.В. Иванов) активно развивается современная технология микроэлектроники — молекулярно-пучковая эпитаксия. Данная эпитаксиальная технология наращивания позволяет получать широкий спектр наноструктур на основе как узкозонных (InSb, InAs, GaSb), так и широкозонных (GaN, AlGaN) полупроводниковых соединений A^{III}B^V, а также на основе A^{II}B^{VI}. Совместно с лабораторией инфракрасной оптоэлектроники были получены и исследованы гибридные гетероструктуры на основе изоморфных гетеропереходов полупроводников A^{III}B^V (InAs, AlGaSb) с полупроводниками A^{II}B^{VI} (CdMgSe) и впервые создан гибридный лазер с активной областью AlGaSb/InAs/CdMgSe, работающий на длине волны 2.78 мкм и сочетающий в себе преимущества гетеропереходов как I, так и II типа [112].

Большая работа была проделана в лаборатории функциональной и физической микроэлектроники (руководитель Р.П. Сейсян) по разработке эпитаксиальной технологии фосфида индия, его твердых растворов InGaAsP и их применению для создания приборов микро- и оптоэлектроники ближнего ИК диапазона (1–1.6 мкм) (А.Т. Гореленок, В.В. Мамутин, Н.М. Шмидт) [113]. С использованием оригинальной методики легирования лантаноидами получены чистые эпитаксиальные слои InP и изопериодные с ними твердые растворы с управляемой концентрацией носителей заряда в диапазоне $10^{13}–10^{17}$ см⁻³ и высокой подвижностью электронов. Впервые получены гетероструктуры InGaAs/InGaAsP/InP с двумерным электронным газом и подвижностью в 2D канале до $7.3 \cdot 10^4$ см²/В·с при 4.2 К [114]. Разработаны диоды Ганна на основе n -InGaAs/ n^+ -InP, полевые транзисторы с барьером Шоттки и высоким коэффициентом усиления по мощности (17 дБ на 4 ГГц). Разработано несколько типов фотоприемников ближнего ИК диапазона (1.2–1.6 мкм) для систем волоконно-оптической связи, в том числе с лавинным умножением, биполярные

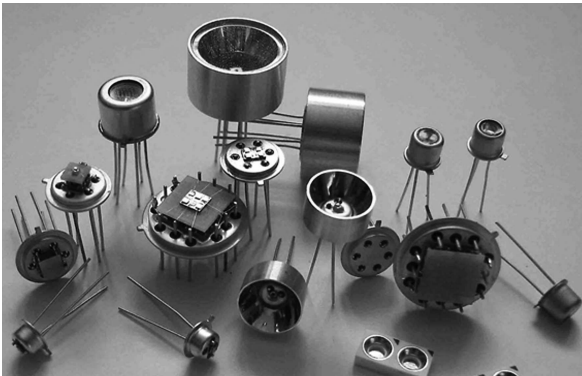


Рис. 13. Светодиоды и фотодиоды для среднего ИК диапазона, выпускаемые фирмой ООО „АИБИ“.

$N-p-N$ -фототранзисторы и др. Все важнейшие результаты по получению, исследованию InP и разработке приборов на его основе находились на уровне лучших зарубежных аналогов, в ряде случаев их превосходили. По итогам этих работ получено 15 авторских свидетельств СССР на изобретения. Указанные разработки проводились в содружестве с научными и исследовательскими коллективами НПО „Орион“, НПО „Дальсвязь“, ВНИИРИП, что способствовало проведению работ по созданию отечественных ВОЛС, а также сетей интегрального обслуживания и кабельного телевидения [115,116].

Известно, что терагерцовая область спектра 0.1–10 ТГц (длины волн 3 мм–300 мкм) весьма привлекательна для многочисленных применений, включающих в первую очередь безопасность, медицину, астрономию и биологию. В настоящее время во всем мире ведутся широкомасштабные исследования, направленные на создание приемников и источников терагерцового излучения различных типов, а также на развитие терагерцовых диагностических технологий [117,118]. В группе оптической спектроскопии и фемтосекундной оптики (В.А. Андрианов, В.Н. Трухин, А.О. Захарьин и др., лаб. В.В. Белькова) ведутся исследования по всем вышеуказанным направлениям. Построен специализированный спектрометр для эмиссионных измерений в терагерцовой области спектра $5-350\text{ см}^{-1}$ ($0.15-10.5\text{ ТГц}$, $0.62-43.4\text{ мэВ}$), и создана высокочувствительная система регистрации сигналов терагерцового излучения, с уровнем шумов $\sim 1 \cdot 10^{-12}\text{ В/Гц}^{1/2}$. Исследована терагерцовая электролюминесценция в квантово-каскадной структуре на основе гетеропереходов GaAs/GaAlAs, Ge/Ga, напряженных структурах с квантовыми ямами GaAsN/GaAs, сильнолегированных слоях $n\text{-InN/Al}_2\text{O}_3$. Показана возможность создания нового класса излучателей ультрафиолетового и видимого диапазонов на основе системы GaN–AlN, интенсивно исследуемой в последнее время.

Нужно отметить, что разработанные в ФТИ источники и детекторы для среднего ИК диапазона, а также оптоэлектронные сенсоры на их основе востребованы как в России, так и за рубежом. Приборы для задач ИК спектроскопии, экологического мониторинга, газового анализа, медицинских приложений были успешно протестированы и в настоящее время используются в России, Белоруссии, Болгарии, Великобритании, США, Германии, Австрии, Чехии, Норвегии, Франции, Китае. Число потребителей этих приборов, с успехом конкурирующих с известными зарубежными разработками за счет своей дешевой воспроизводимой технологии, высоких параметров и стабильности, исчисляется сотнями. Для удовлетворения растущего спроса на эти оптоэлектронные приборы в ФТИ создано несколько малых предприятий („АИБИ“, „Иоффе-ЛЕД“, „Директ“ и др.), занимающихся разработкой, изготовлением и поставкой широкой номенклатуры изделий для среднего ИК диапазона 2–5 мкм (рис. 13).

4. Заключение

Настоящий обзор, представленный к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, посвящен открытию, исследованию и практическому применению полупроводников $A^{III}B^V$ и гетероструктур на их основе, проводимых и внедряемых в Физтехе в течение последних 70 лет. Начало данных работ было положено в лаборатории Д.Н. Наследова, а затем продолжено его учениками и преемниками. В августе 2018 г. исполнилось 115 лет со дня рождения профессора Д.Н. Наследова, выдающегося ученого, лауреата Ленинской и Государственной премий. Его идеям и трудам, а также его многочисленным ученикам и сподвижникам мы обязаны появлением на свет полупроводников $A^{III}B^V$. Данные материалы стали основой для оптоэлектроники, твердотельной электроники, фотоники, микроэлектроники, солнечной энергетики, приборов экологического мониторинга и специального применения в оборонной технике. Они охватывают широкий спектральный диапазон длин волн — от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного излучения, включая сверхвысокие частоты и терагерцы.

Авторитет Д.Н. Наследова и его учеников, широкое взаимодействие его лаборатории с международными лабораториями и институтами (Германии, Франции, Великобритании, США, Чехии, Польши, Турции и др.) путем совместных исследований и обмена аспирантами и сотрудниками привели к достижению новых важных результатов, обогативших физику полупроводников и расширивших возможности их практических применений. Организация научно-технических конференций учениками Д.Н. Наследова во многих республиках бывшего Советского Союза способствовала созданию научных школ по изучению полупроводниковых материалов. Следует отметить, что получение и исследование Ж.И. Ал-

фёровым и его командой гетеропереходов на основе полупроводников $A^{III}B^V$ и создание первого в мире полупроводникового лазера на гетеропереходе, работающего при комнатной температуре, обусловило развитие целого класса новых приборов: квантовых генераторов, фотодетекторов, фототранзисторов, солнечных фотоэлементов. Приоритет этих работ принадлежит Физико-техническому институту им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

- [1] Н.А. Горюнова. *Сложные алмазоподобные полупроводники* (монография) (Л., 1953); А.И. Блум, Н.П. Морковский, А.Р. Регель. *Труды VII Конференции по свойствам полупроводников* (Киев, 1950).
- [2] *Дмитрий Николаевич Наследов (К 100-летию со дня рождения)* (Спб., Из-во СПб ГПУ, 2003, 122 с.).
- [3] Ж.И. Алфёров, Б.В. Царенков. ФТП, **19**, 2113 (1985).
- [4] H. Welker. Zs. Naturforsch., **7a**, 11 (1952).
- [5] Д.Н. Наследов, А.Ю. Халилов. Изв. АН СССР, **20** (12), 1494 (1956).
- [6] О.В. Емельяненко, Д.Н. Наследов. ЖТФ, **28** (6), 1177 (1958).
- [7] В.И. Фистуль. *Сильно легированные полупроводники* (М., Наука, 1967).
- [8] *Арсенид галлия: получение и свойства*, под ред. Ф.П. Кесаманлы и Д.Н. Наследова (М., Наука, 1973).
- [9] К.И. Виноградова, В.В. Галаванов, Д.Н. Наследов, Л.И. Соловьёва. ФТТ, **1**, 403 (1959).
- [10] О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов, Г.Н. Талалакин. ФТТ, **7**, 1315 (1965).
- [11] В.В. Галаванов, Д.Н. Наследов, А.С. Филиппченко. Изв. АН СССР, **23** (6), 963 (1964).
- [12] Ф.П. Кесаманлы, Э.Э. Клотыньш, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов. ФТТ, **6**, 958 (1964).
- [13] Ю.М. Бурдуков, А.Н. Именков, Д.Н. Наследов, Б.В. Царенков. ФТТ, **3**, 991 (1961).
- [14] Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **1**, 748 (1959).
- [15] Д.Н. Наследов, Лянь Чжи-Чао. ФТТ, **2**, 793 (1960).
- [16] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рыбкин, Б.В. Царенков. ФТТ, **4**, 1062 (1962).
- [17] А.Т. Гореленок, Б.В. Царенков. А.с. СССР № 196177, приор. 06.09.1965.
- [18] Б.В. Царенков, Ю.П. Яковлев. А.с. СССР № 383122, приор. 02.06.1970.
- [19] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов. ФТП, **3**, 1370 (1969).
- [20] Л.М. Коган, Л.Д. Литов, Д.Н. Наследов, Т.Ф. Никитина, Т.М. Страховский, Б.В. Царенков. ФТТ, **8**, 2789 (1966).
- [21] В.В. Готов, А.Н. Именков, Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, Б.В. Царенков, Г.В. Царенков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **1** (8), 396 (1975).
- [22] А.А. Гуткин, Д.Н. Наследов, В.Е. Седов, Б.В. Царенков. Радиотехника и электроника, **7** (12), 2095 (1962).
- [23] А.Н. Именков, М.М. Козлов, С.С. Мескин, Д.Н. Наследов, В.Н. Равич, Б.В. Царенков. ФТТ, **7**, 634 (1965).
- [24] Л.М. Коган, С.С. Мескин, Д.Н. Наследов, В.Е. Трушина, Б.В. Царенков. Радиотехника и электроника, **11** (8), 1645 (1966).
- [25] Д.Н. Наследов, Ю.Г. Попов, Ю.С. Сметанникова, И.Н. Ясисевич. ФТТ, **8**, 475 (1966).
- [26] Э.К. Гусейнов, Д.Н. Наследов, Ю.Г. Попов, М. Шляйфштайн. ФТП, **11**, 2211 (1970).
- [27] М.П. Михайлова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков, М. Хамрокулов. ФТТ, **13**, 390 (1973).
- [28] N.M. Kolchanova, M.P. Mikhailova, Yu.S. Smetannikova. *Proc. 8th Int. Symp. Techn. Commun. on Photodetectors, II* (Prague, Czechoslovakia, 1978) p. 439.
- [29] У. Аут, Д. Генцов, К. Герман. *Фотозлектрические явления* (пер. с нем. под ред. В.Л. Бонч-Бруевича) (М., Мир, 1980).
- [30] *Отчет по НИР „Энергия“*, рук. Д.Н. Наследов, Ю.С. Сметанникова (Л., 1959).
- [31] М.П. Михайлова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. Phys. Status Solidi, **11**, 529 (1965).
- [32] И.И. Таубкин. *Программа и тез. докл. Междунар. симп. Полупроводники A^3B^5 . К столетию со дня рождения Д.Н. Наследова* (Санкт-Петербург, 2003) с. 20.
- [33] А.М. Филачев, М.А. Трищенко, И.И. Таубкин. *Состояние и магистральные направления развития твердотельной фотозлектроники* (М., Физматкнига, 2010) с. 126.
- [34] В.В. Исаев-Иванов, Н.М. Колчанова, В.Ф. Мастеров, Д.Н. Наследов, Г.Н. Талалакин. ФТТ, **16**, 1044 (1974).
- [35] А.А. Гуткин, Д.Н. Наследов, Э.М. Миггеррамов, М.П. Михайлова. ФТТ, **8**, 2044 (1966).
- [36] А.С. Волков, В.В. Галаванов, А.А. Гуткин, С.Е. Кумекоев. ФТП, **5**, 2356 (1971).
- [37] Д.Н. Наследов, М.П. Михайлова, С.В. Слободчиков. ФТП, **1**, 123 (1967).
- [38] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 3 (1998).
- [39] Ж.И. Алфёров. *Нобелевская лекция*. УФН, **172** (9), 1068 (2002).
- [40] Ж.И. Алфёров, Р.Ф. Казаринов. А.с. СССР № 181737, приор. 1963 г.
- [41] И.В. Грехов, Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев, А.Ф. Шулкин. Письма ЖТФ, **17**, 44 (1991).
- [42] F. Capasso. In: *Semiconductors and Semimetals, Vol. 22, Lightwave communication technology*, ed. by W.T. Tsang (AT&T Bell Lab., Holmdel, New Jersey) [*Техника оптической связи*, пер. с англ. под ред. М.А. Трищенко (М., Мир, 1988)].
- [43] E.M. Dianov, V.G. Plotnichenko, G.G. Devyatykh, M.F. Churbanov, I.V. Scripachev. Infr. Phys., **29**, 303 (1989).
- [44] J. Lukas. Infr. Phys., **25**, 217 (1985).
- [45] М.П. Михайлова, А.А. Рогачев, И.Н. Ясисевич. ФТП, **10**, 1460 (1976).
- [46] В.И. Корольков, М.П. Михайлова. ФТП, **17**, 869 (1983).
- [47] А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, И.Н. Ясисевич. *Фотоприемники и фотопреобразователи* (Л., Наука, 1986) с. 67.
- [48] M.P. Mikhailova, I.A. Andreev. In: *Mid-infrared optoelectronics*, ed. by A. Krier [Springer series in optical sciences] (Springer, 2006) p. 545.
- [49] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, А.Н. Баранов, М.В. Возницкий, М.П. Михайлова, Т.Н. Сиренко, Ю.П. Яковлев. Опт.-мех. пром-сть, **7**, 19 (1991).
- [50] H. Kroemer, G. Griffiths. IEEE Electron. Dev. Lett., **4**, 20 (1983).
- [51] E.Y. Caine, H. Subbana, H. Kroemer, Y.L. Meltz, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **45**, 1123 (1984).
- [52] А.Н. Баранов, Б.Е. Джурганов, А.Н. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **20**, 2217 (1986).

- [53] П.С. Копьев, А.М. Монахов, Н.Н. Леденцов, А.А. Рогачев. Патент РФ № 2019895 (1989).
- [54] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 1279 (1994).
- [55] J.E. Bauer, A.K. Srivastava, C.A. Burriss et al. *Electron. Lett.*, **22**, 137 (1986).
- [56] J. Bhan, A. Joullie, H. Mani, C. Alibert, J. Benoit, A. Drossan. *Proc. SPIE*, **866**, 127 (1987).
- [57] H. Döhler. *Surf. Sci.*, **98**, 108 (1980).
- [58] А.Н. Баранов, А.Н. Гусейнов, А.А. Рогачев, А.Н. Титков, В.Н. Чебан, Ю.П. Яковлев. Письма ЖЭТФ, **48**, 378 (1988).
- [59] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, А.А. Рогачев, Г.М. Филаретова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **14**, 173 (1988).
- [60] H. Sakaki, L.L. Chang, R. Ludeke, Ch.A. Chang, G.A. Sai-Halasz, L. Esaki. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 211 (1977).
- [61] М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, Ю.П. Сморгачова, И.Н. Тимченко, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев, И.Н. Ясиевич. ФТП, **24**, 1397 (1990).
- [62] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 678 (1995).
- [63] М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **41**, 166 (2007).
- [64] R. Magri, A. Zunger, H. Kroemer. *J. Appl. Phys.*, **98**, 043701 (2005).
- [65] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 985 (1996).
- [66] К.Д. Моисеев, А.А. Ситникова, Н.Н. Фалеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 1438 (2000).
- [67] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R909 (2004).
- [68] Т.И. Воронина, М.П. Михайлова, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34**, 189 (2000).
- [69] V.A. Berezovets, M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, R.V. Parfeniev, Yu.A. Yakovlev, V.I. Nizhankovskii. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **195**, 194 (2003).
- [70] Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Р.В. Парфеньев, В.И. Нижанковский, К.С. Романов. ФТТ, **46**, 2083 (2004).
- [71] В.А. Березовец, К.Д. Моисеев, М.П. Михайлова, Р.В. Парфеньев, Ю.П. Яковлев, В.И. Нижанковский. ФНТ, **33** (2–3), 194 (2007).
- [72] R.V. Parfeniev, K.D. Moiseev, V.A. Berezovets, N.S. Averkiev, M.P. Mikhailova, V. Nizhankovskii, D. Kaczorowski. *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 712 (2009).
- [73] I. Knez, R.R. Du, G. Sullivan. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 136603 (2011).
- [74] C. Liu, T.L. Hughes, X.-L. Qi, K. Wang, S.-C. Zhang. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 236601 (2008).
- [75] K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. In: *MID-infrared optoelectronics*, ed. by A. Krier (Springer, 2006) p. 219.
- [76] M.P. Mikhailova, N.D. Stoyanov, O.V. Andreichuk, K.D. Moiseev, I.A. Andreev, M.A. Afrailov, Yu.P. Yakovlev. *IEEE Proc. Optoelectron.*, **149**, 41 (2002).
- [77] V.A. Wilson. *IEEE J. Quant. Electron.*, **24**, 1763 (1988).
- [78] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журганов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**, 998 (2003).
- [79] Б.Е. Журганов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, А.Е. Розов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **27** (5), 1 (2001) (премия МАИК).
- [80] В.В. Романов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, К.Д. Моисеев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **27** (14), 80 (2001).
- [81] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.В. Пенцов, Ю.П. Сморгачова, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **18** (17), 50 (1992).
- [82] В.И. Иванов-Омский, Б.Т. Коломиец, В.А. Смирнов. Докл. АН СССР, **161**, 1308 (1965).
- [83] T. Kuusela, J. Peura, V.A. Matveev, M.A. Remenny, N.M. Stus. *Vibrational Spectroscopy*, **51**, 289 (2009).
- [84] М.П. Михайлова, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев, Е. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, T. Šimeček. ФТП, **44**, 69 (2010).
- [85] И.А. Андреев, М.П. Михайлова, Г.Г. Коновалов, Л.В. Данилов, Е.В. Куницына, Р.Г. Левин, Б.В. Пушный, Ю.П. Яковлев. Тез. докл. XXV Междунар. науч.-техн. конф. и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения (М., Россия, 2018) т. 1, с. 73.
- [86] М.А. Ременный, С.А. Карандашев, А.А. Климов, Н.С. Майоров, Б.А. Матвеев, А.С. Петров. Тез. докл. XXV Междунар. науч.-техн. конф. и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения (М., Россия, 2018) т. 1, с. 77.
- [87] M. Mikhailova, N. Stoyanov, I. Andreev, V. Zhurtanov, S. Kizhaev, E. Kunitsyna, Kh. Salikhov, Yu. Yakovlev. *Proc. SPIE*, **6585**, 658526 (2007).
- [88] А.Н. Баранов, А.Н. Именков, А.И. Клементенок, М.П. Михайлова, В.Л. Шутов, Ю.П. Яковлев. А.с. СССР № 141242, приор. 01.04.1988.
- [89] К.В. Калинина, С.С. Молчанов, Н.Д. Стоянов, А.П. Астахова, Х.М. Салихов, Ю.П. Яковлев. ЖТФ, **80** (2), 99 (2010).
- [90] Х.М. Салихов, Н.Д. Стоянов. Альтернативная энергетика и экология, **10**, 15 (2009).
- [91] Yu.P. Yakovlev, I.A. Andreev, S.S. Kizhaev, E.V. Kunitsyna, M.P. Mikhailova. *Proc. SPIE*, **6636**, 66360D (2007).
- [92] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, Е.В. Куницына, В.В. Дюделев, И.М. Гаджиев, А.Г. Дерягин, Е.А. Гребенщикова, Г.Г. Коновалов, М.П. Михайлова, Н.Д. Ильинская, В.И. Кучинский, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **36** (9), 43 (2010).
- [93] www.hamamatsu.com
- [94] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, В.М. Лантратов, Т.В. Львова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **31**, 653 (1997).
- [95] Lord Rayleigh. *Phyl. Mag.*, **20**, 1001 (1910).
- [96] A. Krier, V.V. Sherstnev, D. Wright, A.M. Monakhov, G. Hill. *Electron. Lett.*, **39**, 916 (2003).
- [97] A.M. Monakhov, V.V. Sherstnev, A.P. Astakhova, Yu.P. Yakovlev, G. Boissier, R. Tessier, A.N. Baranov. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 051102 (2009).
- [98] К.Д. Моисеев, Я.А. Пархоменко, Е.В. Гущина, А.В. Анкудинов, М.П. Михайлова, Н.А. Берг, Ю.П. Яковлев. ФТП, **43**, 1142 (2009).
- [99] K. Moiseev, V. Romanov, P. Dement'ev, M. Mikhailova. *J. Cryst. Growth*, **318**, 379 (2011).
- [100] Л.А. Сокура, Я.А. Пархоменко, К.Д. Моисеев, В.Н. Неведомский, Н.А. Берг. ФТП, **51**, 1146 (2017).
- [101] В.В. Романов, М.В. Байдакова, К.Д. Моисеев. ФТП, **48**, 753 (2014).
- [102] В.В. Романов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТП, **48**, 938 (2014).
- [103] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова, И.Н. Ясиевич. ФТП, **16**, 592 (1982).
- [104] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич. *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках* (СПб., ФТИ, 1997) с. 376.

- [105] Г.Г. Зегря, В.А. Харченко. ЖЭТФ, **101**, 327 (1992).
- [106] К.В. Калинина, М.П. Михайлова, Б.Е. Журганов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47**, 75 (2013).
- [107] M.P. Mikhailova, E.V. Ivanov, L.V. Danilov, K.V. Kalinina, N.D. Stoyanov, G.G. Zegrya, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, M. Zikova. J. Appl. Phys., **112**, 023108 (2012).
- [108] Л.В. Данилов, А.А. Петухов, М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, Э.В. Иванов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **50**, 794 (2016).
- [109] M.P. Mikhailova, A.I. Veinger, I.V. Kochman, P.V. Semenikhin, K.V. Kalinina, R.V. Parfeniev, V.A. Berezovetz, A. Hospodková, J. Pangrác, E. Hulicius. J. Nanophoton., **10**, 046013 (2016).
- [110] М.П. Михайлова, В.А. Березовец, Р.В. Парфеньев, Л.В. Данилов, М.О. Сафончик, А. Hospodkova, J. Pangrac, E. Hulicius. ФТП, **51**, 1393 (2017).
- [111] A. Hospodková, J. Pangrác, E. Hulicius, F. Dominec, M.P. Mikhailova, A.I. Veinger, I.V. Kochman. J. Cryst. Growth, **464**, 206 (2017).
- [112] S.V. Ivanov, V.A. Kaygorodov, S.V. Sorokin, B.Ya. Meltser, V.A. Solov'ev, Ya.V. Terent'ev, O.G. Lyublinskaya, K.D. Moiseev, E.A. Grebenshchikova, M.P. Mikhailova, A.A. Toropov, Yu.P. Yakovlev, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov. Appl. Phys. Lett., **82**, 3782 (2003).
- [113] С.И. Кохановский, Ю.М. Макушенко, Р.П. Сейсян, Ал.Л. Эфрос, Т.В. Язева, М.А. Абдуллаев. ФТП, **25**, 493 (1991).
- [114] А.Т. Гореленок, В.В. Мамутин, А.В. Приходько, Ю.В. Шмарцев. ФТП, **20**, 1488 (1986).
- [115] А.Т. Гореленок, А.В. Каманин, Н.М. Шмидт. Волоконно-оптич. техн., **2**, 13 (1993).
- [116] Н.Н. Зиновьев, А.В. Андрианов, В.Ю. Некрасов, В.А. Петровский, Л.В. Беляков, О.М. Срессели, G. Hill, J.M. Chamberlain. Письма ЖТФ, **74**, 105 (2001).
- [117] N.N. Zinov'ev, A.V. Andrianov. Appl. Phys. Lett., **95**, 011114 (2009).
- [118] S.D. Ganichev, W. Prette. *Intense Terahertz Excitation of Semiconductors* (Oxford, Oxford Univ. Press, 2006) p. 252.

Редактор Л.В. Шаронова

Discovery of A^{III}B^V semiconductors: physical properties and application

M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Institute,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract This review is devoted to the discovery, technology development and research of A^{III}B^V semiconductors, conducted at the Ioffe Institute, where in 1950 the first steps were taken in obtaining A^{III}B^V semiconductors and initial studies of their fundamental properties under the guidance of two famous scientists — Nina Alexandrovna Goryunova and Dmitry Nikolayevich Nasledov. Further progress of these works was reflected in the works of the followers and students of D.N. Nasledov, who worked and continue to work in the Ioffe Institute units. The contribution of these studies to the study of heterostructures based on A^{III}B^V compounds, as well as to the development of semiconductor devices for electronics, optoelectronics, and photonics is considered.