

УДК 621.315.592

## Роль Дмитрия Николаевича Наследова в становлении и развитии физики и техники полупроводников $A^{III}B^V$

(к 100-летию со дня рождения)

© О.В. Емельяненко, Н.М. Колчанова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 10 февраля 2003 г. Принята к печати 17 февраля 2003 г.)

12 августа 2003 года исполняется 100 лет со дня рождения Дмитрия Николаевича Наследова — выдающегося ученого, доктора физико-математических наук, профессора, лауреата Ленинской и Государственной премией СССР, заведующего лабораторией электронных полупроводников Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (1957–1973 г.г.) и заведующего кафедрой экспериментальной физики Ленинградского Политехнического института (1947–1975 г.г.). Д.Н. Наследов внес выдающийся вклад в становление и развитие физики и техники полупроводников  $A^{III}B^V$  и воспитание научных кадров в области физики полупроводников в Советском Союзе.

Исследования соединений  $A^{III}B^V$  в Советском Союзе были начаты в первой половине 1950-х годов в Физико-техническом институте (ФТИ, Физтех) АН СССР. Дмитрий Николаевич Наследов, заместитель директора института и заведующий лабораторией полупроводников, принял решение поддержать работы Н.А. Горюновой по антимониду индия и расширить их на весь класс материалов данного типа ( $In, Ga, Al \leftrightarrow Sb, As, P$ ). Нужны были большая научная смелость и предвидение, чтобы принять подобное решение. Соединениями  $A^{III}B^V$  в то время занималась еще только одна лаборатория в мире — лаборатория профессора Велькера в ФРГ. 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. Время показало иное.

Первое крупное сообщение об исследованиях  $A^{III}B^V$  ( $InSb, InAs$ ) в Физтехе было сделано Д.Н. Наследовым на 1-й Всесоюзной конференции по полупроводникам (Ленинград, 1956 г.) [1]. Он отметил, наряду с другими эффектами, что ни электропроводность, ни эффект Холла в новых материалах не зависят от температуры. Многим это казалось странным и даже случайным. Однако уже в ближайшие годы обнаружилось, что этот результат является следствием сильного вырождения электронного газа, которое типично для сильно легированных (тогда — просто „грязных“)  $A^{III}B^V$ . Принципиально новые эффекты в таких кристаллах составили в дальнейшем новый раздел физики полупроводников — физика сильно легированных материалов. Вклад лаборатории Д.Н. Наследова в эти исследования отражен в работах [2–5].

Вообще вопрос о возможностях легирования и очистки был центральным для судьбы новых соединений. Отклонения от стехиометрии, высокая реактивность составляющих ( $As, P$ ), отсутствие ясности в картине встраивания и удаления примесей — все это создавало порой ощущение безвыходности ситуации. Все, что решалось, решалось впервые. Большую роль для продвижения вперед сыграло в это время тесное сотрудничество физиков с химическим крылом группы лаборатория Д.Н. Наследова, которым руководила Н.А. Горюнова. Физики разрабатывали методику зонной плавки (очистки) и метод вытягивания кристаллов по Чохральскому [4], химики варили „бульбы“ (синтезировали слитки) в ампулах, и весьма успешно [6].

Уже к концу 50-х–началу 60-х годов работа дала 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. В.В. Галаванов и К.И. Виноградова получили и исследовали чистейшие в мире кристаллы  $InSb$ : концентрация электронов  $n \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $\mu \approx 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 77 К [7]. Б.В. Царенков с сотрудниками создают и изучают диффузионные и сплавные  $p$ – $n$ -переходы на основе  $GaAs$ . Созданные при этом солнечные фотоэлементы показывают рекордный для тех времен КПД, достигавший (6–8)% [8,9]. Группа О.В. Емельяненко продолжила исследование явлений переноса. Наиболее интересными оказались исследования примесной зоны [10,11], а позднее открытие гигантского магнитосопротивления при движении носителей по примесям [12], изучение перехода „металл–полупроводник“ в соединениях  $A^{III}B^V$ , определение природы отрицательного (квантового) магнитосопротивления [13]. Во всех этих работах простоту и точность анализа обеспечивала принципиальная особенность  $A^{III}B^V$  — сферичность их зоны проводимости. Были изучены свойства примесей, явления переноса, фотоэлектрические явления, эффекты выпрямления в  $InSb, InAs, GaAs, AlSb, InP$  [14–19]. Эти и другие результаты убедительно показали, что  $A^{III}B^V$  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 работающих с  $A^{III}B^V$ , как и сама тематика, теперь стремительно расширяются. Группа  $A^{III}B^V$  в Физтехе преобразуется в 1957 г. в лабораторию электронных полупроводников. Под патронажем Д.Н. Наследова возникают центры работ с  $A^{III}B^V$  в других городах Советского Союза (Баку, Кишиневе, Орджоникидзе и т.д.). В соревнование вступают институты Москвы, Украины, зарубежные лаборатории. В условиях быстро растущей конкуренции лаборатория Д.Н. Наследова делает рывок, определивший главную линию в судьбе  $A^{III}B^V$ .

В 1962 г. было показано [20–22], что спектр люминесценции  $p$ – $n$ -переходов из GaAs заметно сужается с увеличением тока, что можно было объяснить только появлением стимулированного излучения. Это было первым в мире наблюдением стимулированного излучения в полупроводниках. GaAs, как и ряд других  $A^{III}B^V$ , имеет сферическую зону проводимости с центром в той же точке  $k = 0$ , что и валентная зона. Эта принципиальная особенность  $A^{III}B^V$  отличает их от огромного числа других, непрямозонных, полупроводников (в том числе Ge и Si) и приближает вероятность получения рекомбинационного излучения в них к 100%.

В 1964 г. за работы, приведшие к созданию полупроводниковых лазеров, Д.Н. Наследова, С.М. Рывкин, А.А. Рогачев и Б.В. Царенков были удостоены Ленинской премии. В недрах лаборатории формируется новое революционное направление твердотельной физики и техники — оптоэлектроника. Для создания оптоэлектронных приборов на основе бинарных соединений и варизонных структур  $A^{III}B^V$  был впервые в ФТИ разработан метод жидкофазной эпитаксии (А.Т. Гореленок, Ю.П. Яковлев) как в открытой, так и в закрытой системах [23,24]. В последующие годы разработанные в лаборатории Д.Н. Наследова методы жидкофазной эпитаксии были широко использованы в других полупроводниковых лабораториях института. В группе Б.В. Царенкова активно развиваются работы по исследованию излучательной рекомбинации и созданию лазеров и светодиодов на основе  $p$ – $n$ -структур из GaAs, GaP и варизонных  $p$ – $n$ -структур в системах твердых растворов GaAlAs и GaAlSb. Изготавливаются первые поверхностно-барьерные структуры на основе  $A^{III}B^V$  (Ю.А. Гольдберг и Е.А. Поссе), соответствующие идеальной теоретической модели.

Высокий уровень научных разработок излучательных приборов в лаборатории Д.Н. Наследова обеспечил основу для их внедрения в промышленное производство. В 1960 г. было принято постановление Совета Министров 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-Гардт) 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.

Исследование процессов рекомбинации неравновесных носителей заряда и создание элементной базы оптоэлектроники — фотоприемников и излучателей — становится одним из ведущих направлений научной работы лаборатории [25–32].

В 1964–1966 г.г. Д.Н. Наследовым с сотрудниками Ю.С. Сметанниковой и Ю.Г. Поповым было открыто и изучено новое физическое явление — осцилляции фотопроводимости и фотомагнитного эффекта при низких температурах в узкозонном полупроводнике InSb [29,30]. Позднее эти эффекты были обнаружены в InAs [31], GaSb, GaAs. Работы по разогреву и охлаждению электронно-дырочной плазмы в полупроводниках получили международную известность и широко цитируются в статьях и монографиях.

Работы лаборатории по исследованию фотоэлектрических явлений в  $A^{III}B^V$  нашли практическое применение. Так, были разработаны первые отечественные фотодетекторы среднего инфракрасного диапазона на основе InSb и InAs и переданы для внедрения в производство в Институт прикладной физики (НИИПФ) (работы группы С.В. Слободчикова и М.П. Михайловой).

В 70-е годы наряду с расширением тематики лаборатории стремительно привлекаются новые методики исследования. На огромный практический интерес в мире к примесям кислорода и элементов железа, позволяющим получить полуизолирующие кристаллы арсенида галлия, быстро реагирует лаборатория Д.Н. Наследова. 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 методик и с их применением всесторонне и углубленно исследовать центры, образующие глубокие уровни, сначала в GaAs, а потом и других соединениях  $A^{III}B^V$ .

Привлечение резонансных методик (ЭПР, ЯМР) позволило за короткое время сделать значительный рывок в понимании этого вопроса. Именно тогда были получены и изучены ферромагнитные свойства кристаллов GaAs, легированных железом [32].

Возвращаясь к трудам лаборатории профессора Д.Н. Наследова, мы можем теперь отметить, что 1960–1970 г.г. были плодотворными годами возмужания ее сотрудников. Д.Н. Наследов еще более, чем прежде, пускает их в „свободное плавание“, считая, что самореализация есть лучший способ мобилизации творческой энергии. Накопленный потенциал дал богатейшие результаты, пополнившие мировую науку и технику  $A^{III}B^V$  в самых разных областях.

В это время лаборатория становится настоящей кузницей кадров: в ней работают десятки аспирантов и сотрудников со всех краев Союза: от Новосибирска до Кишинева. Студенки лаборатории, пришедшие в годы ее зарождения со студенческой скамьи, вырастают в самостоятельных исследователей, известных своим вкладом в дело исследования  $A^{III}B^V$  в стране и в мире. Библиография данной статьи дает об этом лишь частичное представление. Отметим наиболее ярких физтеховцев, выросших под крылом Д.Н. Наследова и продолживших совместную с ним работу уже руководителями отдельных групп и направлений: Г.Н. Талалакин (очистка, легирование и выращивание кристаллов зонным методом, а в дальнейшем методом жидкофазной эпитаксии), Ю.М. Бурдуков (решение тех же проблем методом Чохральского); О.В. Емельяненко и Т.С. Лагунова (фундаментальные исследования явлений переноса в  $A^{III}B^V$ , твердых растворах и структурах на их основе); Б.В. Царенков вместе с А.Н. Именковым, В.В. Евстроповым, Т.Н. Даниловой, Ю.П. Яковлевым (фундаментальные исследования и техническое приложение  $p-n$ -переходов в GaAs, фотоэлементов и излучателей на основе варизонных  $A^{III}B^V$ ); Н.В. Зотова (создание  $p-n$ -структур на InAs и исследование их электролюминесцентных свойств); М.П. Михайлова, Ю.С. Сметанникова, С.В. Слободчиков, Н.М. Колчанова, М.А. Сиповская (фундаментальные исследования фотоэлектромагнитных свойств соединений  $A^{III}B^V$ ); А.А. Гуткин и В.Е. Седов (создание и исследование фотоэлементов на основе GaAs и исследование глубоких центров в GaAs). Работы по технологии получения полупроводников  $A^{III}B^V$  и внедрению их в производство были удостоены Государственных премий СССР (Д.Н. Наследов, Ю.М. Бурдуков). Лаборатория Д.Н. Наследова была неоднократным участником и призером ВДНХ, где экспонировались новые технические разработки, полученные под руководством Дмитрия Николаевича Наследова. Школа Д.Н. Наследова поставила Советский Союз в число передовых держав по освоению новых материалов. Доклады Д.Н. Наследова по  $A^{III}B^V$  вызывали большой интерес и признание на международных конференциях. В 1968 г. Д.Н. Наследов был избран член-корреспондентом Академии наук и литературы в г. Майнце, ФРГ.

В 1968 г. на юбилейных торжествах, посвященных 50-летию Физтеха, Ж.И. Алфёров, ныне лауреат Нобелевской премии, отмечает 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 [33]: „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“.

Прошло четверть века после смерти Д.Н. Наследова. На базе лаборатории Д.Н. Наследова выросла новая лаборатория — лаборатория инфракрасной оптоэлектроники, которой руководит один из бывших сотрудников Д.Н. Наследова, ныне доктор физико-математических наук, профессор Юрий Павлович Яковлев. Если в 50-е годы основным объектом изучения были бинарные соединения  $A^{III}B^V$ , то сейчас для решения научных и практических задач используются многокомпонентные твердые растворы и гетеропереходы на основе  $A^{III}B^V$ , за исследование которых в те далекие 50-ые годы взялся Дмитрий Николаевич. Шли годы. Изменилась технология. Расширился круг задач. Однако традиции, заложенные в середине прошлого века, сохранились.

Основное направление лаборатории сегодня — это создание и исследование оптоэлектронных приборов (лазеров, светодиодов и фотодиодов) для средней инфракрасной области спектра 2–5 мкм на основе гетероструктур  $A^{III}B^V$  [34–36]. Спектральный диапазон 2–5 мкм содержит много основных линий поглощения природных и промышленных газов, поэтому применение оптических неразрушающих методов обнаружения в атмосфере спонтанных и когерентных источников света открывает широкие перспективы в области контроля и сохранения окружающей среды. В лаборатории сохранены дух и стиль работы Д.Н. Наследова. Развивается технология выращивания многослойных гетероструктур методами жидкофазной эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Исследуются магнито-транспортные свойства гетероструктур из узкозонных многокомпонентных твердых растворов на основе GaSb и InAs [37]. Разрабатываются и исследуются спонтанные и когерентные источники излучения для инфракрасной области спектра, работающие при комнатной температуре [38]. Разрабатываются перестраиваемые по частоте диодные лазеры, которые успешно используются в диодной лазерной спектроскопии для обнаружения сверхмалых количеств загрязняющих веществ в окружающей среде (1 ppm–1 ppb). К настоящему времени уже созданы высокоэффективные светодиоды спектрального диапазона 2–4 мкм, которые применяются в портативных газовых анализаторах, а также инфракрасные лазеры с мощностью излучения до 6 Вт [35]. Впервые созданы быстродействующие  $p-i-n$ -диоды и лавинные фотодиоды с большим отношением коэффициентов ударной ионизации [36].

Таким образом, пионерская работа по созданию и исследованию соединений  $A^{III}B^V$ , которая была начата выдающимся ученым профессором Д.Н. Наследовым совместно с сотрудниками более полувека назад, нашла свое творческое продолжение в современных исследованиях физики и технологии наногетероструктур и новых оптоэлектронных приборов на основе полупроводников  $A^{III}B^V$ .

Вспоминая добрыми словами нашего учителя Д.Н. Наследова, будем следовать его любимому девизу: „Так держать!“

## Список литературы

- [1] Д.Н. Наследов, А.Ю. Халилов. Изв. АН СССР, **20** (12), 1494 (1956).
- [2] О.В. Емельяненко, Д.Н. Наследов. ЖТФ, **28** (6), 1177 (1958).
- [3] О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов. ФТТ, **2** (2), 192 (1960).
- [4] В.И. Фистуль. *Сильно легированные полупроводники* (М., Наука, 1967).
- [5] *Арсенид галлия: получение и свойства*, под ред. Ф.П. Кесаманлы и Д.Н. Наследова (М., Наука, 1973).
- [6] Н.А. Горюнова. *Химия алмазоподобных полупроводников* (Ленинград, изд. ЛГУ, 1963).
- [7] К.И. Виноградова, В.В. Галаванов, Д.Н. Наследов, Л.И. Соловьева. ФТТ, **1** (3), 403 (1959).
- [8] Ю.М. Бурдуков, А.Н. Именков, Д.Н. Наследов, Б.В. Царенков. ФТТ, **3** (3), 991 (1961).
- [9] А.А. Гуткин, Д.Н. Наследов, В.Е. Седов. ФТТ, **7** (1), 81 (1965).
- [10] О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов, Г.Н. Талалакин. ФТТ, **7** (5), 1315 (1965).
- [11] Ф.П. Кесаманлы, Э.Э. Клотыньш, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов. ФТТ, **6** (3), 958 (1964).
- [12] О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов, Д.Д. Недеогло, И.Н. Тимченко. ФТП, **7** (10), 1919 (1973).
- [13] Т.И. Воронина, О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, З.И. Чугуева, З.Ш. Яновицкая. ФТП, **17** (10), 1841 (1983).
- [14] В.В. Галаванов, Д.Н. Наследов, А.С. Филипченко. Известия АН СССР, **23** (6), 963 (1964).
- [15] Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **1** (5), 748 (1959).
- [16] Д.Н. Наследов, Лянь Чжи-Чао. ФТТ, **2** (5), 793 (1960).
- [17] М.П. Михайлова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **5** (5), 1227 (1962).
- [18] Н.М. Воронкова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **5** (11), 3259 (1963).
- [19] Н.П. Есина, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов. ФТП, **3** (9), 1370 (1969).
- [20] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков. ФТТ, **4** (4), 1062 (1962).
- [21] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, В.Е. Харчиев, Б.В. Царенков. ФТТ, **4** (11), 3346 (1962).
- [22] D.N. Nasledov, V.V. Tsarenkov. *Proc. Intern. Conf. Phys. Semicond.* (Kyoto, 1966) p. 302.
- [23] А.Т. Гореленок, Б.В. Царенков. А.с. СССР № 196177, приор. 06.09.1965.
- [24] Б.В. Царенков, Ю.П. Яковлев. А.с. СССР № 383122, приор. 02.06.1970.
- [25] Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **4** (11), 3161 (1962).
- [26] Д.Н. Наследов, Ю.С. Сметанникова. ФТТ, **4** (1), 110 (1962).
- [27] М.П. Михайлова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков. ФТТ, **4** (5), 1227 (1962).
- [28] Н.М. Воронкова, Д.Н. Наследов. ФТТ, **6** (7), 2196 (1964).
- [29] Д.Н. Наследов, Ю.Г. Попов, Ю.С. Сметанникова. ФТТ, **6** (12), 3728 (1964).
- [30] Д.Н. Наследов, Ю.Г. Попов, Ю.С. Сметанникова, И.Н. Ясисевич. ФТТ, **8** (2), 475 (1966).
- [31] М.П. Михайлова, Д.Н. Наследов, С.В. Слободчиков, М. Хамракулов. ФТТ, **13**, 390 (1973).
- [32] В.В. Исаев-Иванов, Н.М. Колчанова, В.Ф. Мастеров, Д.Н. Наследов, Г.Н. Талалакин. ФТТ, **16** (4), 1044 (1974).
- [33] Ж.И. Алфёров, В.И. Иванов-Омский, Л.Г. Парицкий, В.Я. Френкель. ФТП, **2** (10), 1397 (1968).
- [34] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журганов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 996 (2003).
- [35] M. Aidaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandoshov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus, G.N. Talalakin, W.W. Bewley, J.R. Linde, J.R. Meyer. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (7), 1166 (2002).
- [36] И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, М.А. Мирсагаатов, М.П. Михайлова, И.Н. Маринская, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **15** (17), 71 (1989).
- [37] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, Н.Д. Моисеев, А.Е. Розов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **34** (2), 194 (2000).
- [38] А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, П. Кубат, Н.Д. Моисеев, С. Цивиш, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35** (3), 375 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

### The role of Professor D.N. Nasledov in formulating and development of physics and technology of A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> semiconductors

O.V. Emelyanenko, N.M. Kolchanova, M.P. Mikhailova, Yu. P. Yakovlev

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia