В. М. Грабов

ПРОФЕССОР Г. А. ИВАНОВ И ЕГО НАУЧНАЯ ШКОЛА

Статья посвящена памяти профессора Г. А. Иванова — известного ученого, специалиста в области физики твердого тела, педагога, заведующего кафедрой общей и экспериментальной физики РГПУ им. А. И. Герцена, организатора научного направления и научной школы в области физики полуметаллов и узкозонных полупроводников. Дана характеристика его научной и педагогической деятельности. Произведен обзор основных научных результатов, полученных Г. А. Ивановым и его научной школой.

Георгий Александрович Иванов относится к поколению ученых, чьи школьные годы пришлись на предвоенное время, а окончание школы практически совпало с началом Второй мировой войны. Природа щедро одарила Георгия Александровича: наряду со способностями к наукам он имел хороший голос, занимался живописью.

После войны, в 1945 году, Г. А. Иванов поступает на физико-математический факультет Ленинградского государственного педагогического института, где в это время работает известный специалист в области физики твердого тела, соратник А. Ф. Иоффе, впоследствии директор института полупроводников АН СССР, прекрасный педагог Анатолий Робертович Регель. Встреча с А. Р. Регелем предопределила всю дальнейшую судьбу Г. А. Иванова. До конца своей жизни Георгий Александрович с благодарностью и глубоким уважением вспоминал своего учителя.

В 1952 году по результатам исследования электрических и гальваномагнитных свойств висмута и его сплавов, выполненных под руководством А. Р. Регеля, Георгий Александрович успешно защищает кандидатскую диссертацию и с 1952 по 1999 год является сотрудником Ленинградского педагогического института, ныне Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, где в течение 30 лет (с 1961 по 1991 год) заведует кафедрой общей и экспериментальной физики. Интуиция ученого подсказывала, что начатая им тема научной работы очень перспективна и может иметь большой практический выход.

Он основывает на вверенной ему кафедре новое научное направление по физике полуметаллов и узкозонных полупроводников. С помощью аспирантов создает научную лабораторию и на базе этой лаборатории свою научную школу.

Интенсивные научные исследования обеспечили широкую возможность подготовки научно-педагогических кадров. За время работы в РГПУ им. А. И. Герцена Г. А. Иванов подготовил более 60 кандидатов и 6 докторов физико-математических наук. В настоящее время его ученики работают в вузах и научных учреждениях России и за рубежом. Многие из них стали докторами наук, профессорами, заведующими кафедрами, проректорами и ректорами вузов. Один из его первых учеников Д. В. Гицу является академиком АН Молдовы.

Наиболее актуальным оказалось направление, связанное с исследованием физических свойств полуметаллов V группы: висмута, сурьмы и их сплавов. Промежу-

точное положение полуметаллов между полупроводниками и металлами, наличие у них одновременно свойств, присущих как типичным полупроводникам, так и типичным металлам, обеспечило возможность проведения широкого фронта исследований с установлением ряда фундаментальных закономерностей физики твердого тела.

Первые исследования влияния легирующих примесей на электрические свойства поликристаллов висмута, выполненные Г. А. Ивановым, положили начало изучению физических явлений в полуметаллах и их зонной структуры методом легирования донорными и акцепторными примесями.

Одной из важнейших областей практического применения узкозонных полупроводников на основе кристаллов висмут-сурьма является низкотемпературное термоэлектричество. Работы Г. А. Иванова в этом направлении относятся как к оптимизации термоэлектрических свойств материалов, так и разработке новых конструкций термоэлектрических преобразователей энергии, отмеченных более чем 30 авторскими свидетельствами.

Ниже представлены основные результаты научных исследований полуметаллов типа висмута, выполненных в рамках научной школы Г. А. Иванова, в том числе под его непосредственным руководством.

1. Закономерности роста и дефекты кристаллов типа висмута

С самого начала исследований Г. А. Иванов уделяет большое внимание качеству изучаемых образцов, так как надежные и достоверные научные результаты могут быть получены только при исследовании монокристаллов высокой чистоты и совершенной структуры.

Для выращивания кристаллов в лаборатории применялись материалы высокой чистоты, выпускаемые в то время Московским НИИ «Гиредмет», — Bi-000 и Sb-000. В качестве основного метода выращивания монокристаллов на основе результатов ряда исследований был выбран метод горизонтальной зонной перекристаллизации. Этим методом были выращены серии монокристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма, как нелегированных, так и легированных донорными и акцепторными примесями. Полученные в лаборатории Г. А. Иванова монокристаллы высокого качества исследовались не только на его кафедре, но в лаборатории кинетических явлений ФТИ им. А. Ф. Иоффе, на кафедре физики низких температур МГУ им. М. В. Ломоносова, в институте прикладной физики АН Молдовы и др.

1.1. *Общие проблемы выращивания кристаллов типа висмута*

Кристаллы типа висмута обладают значительной анизотропией скоростей роста [8], что обычно приводит к появлению нескольких крупных двойников в слитке при выращивании без затравок. В. М. Овсяновым и В. Л. Налетовым [50] были установлены преимущественные направления роста кристаллов, в которых при выращивании методом зонной перекристаллизации от затравки с большой степенью вероятности можно получить единый монокристаллический слиток.

1.2. *Выращивание кристаллов сплавов висмут-сурьма*

Система сплавов висмут-сурьма имеет типичную для простейших твердых растворов сигарообразную диаграмму состояний [9, 48]. Большая разница в температурах плавления — 271,3°C для висмута и 630,5°C для сурьмы — приводит к концентрационному переохлаждению на фронте кристаллизации и дендритной ликвации в слитке. Экспериментально установлено, что для снятия концентрационного переохлаждения и выращивания однородных монокристаллов системы висмут-сурьма необходимо использовать малые градиенты температур на фронте кристаллизации и скорости роста менее

0,5 мм/ч [44]. Разработка методов выращивания монокристаллов, в том числе с применением дополнительной очистки исходных материалов, была продолжена в Курганском университете выпускниками аспирантуры РГПУ им. А. И. Герцена В. Л. Налетовым, В. А. Куликовым, В. М. Овсяновым, А. С. Парахиным, В. И. Бочеговым. Ими также разработана методика легирования и выращивания кристаллов термоэлектрических материалов на основе теллуридов висмута и сурьмы.

1.3. *Металлографический и рентгеноструктурный анализ кристаллов*

Исследовалась блочная структура кристаллов висмута, сурьмы и системы висмут-сурьма, выращенных зонной перекристаллизацией без использования затравок, в частности, корреляция кристаллографической ориентации граничащих монокристаллических блоков [20]. Для определения закономерностей корреляции измерены углы между плоскостями (111) блоков в слитках и проведена статистическая обработка результатов. Обнаружена новая система двойникования в кристаллах типа висмута, в которой для двух смежных ячеек общим элементом является грань псевдокуба, а не ребро, как в известной системе двойникования. Сделан вывод, что блочная структура кристаллов типа висмута, выращенных методом зонной перекристаллизации, обусловлена в основном двойникованием в процессе роста. При этом преимущественные направления выращивания единого монокристаллического слитка соответствуют направлениям минимальной вероятности зарождения двойников. Исследования процессов двойникования и влияния двойников на явления переноса были продолжены В. Л. Налетовым, В. М. Овсяновым и А. С. Парахиным в Курганском университете, Ю. Т. Левицким и С. В. Ланкиным в Благовещенском педагогическом университете.

1.4. *Выращивание легированных кристаллов висмут-сурьма*

Кристаллы Bi и Bi-Sb, легированные Sn, Pb, Se, Te, выращивались после многократного зонного выравнивания примеси при тех же скоростях, что и нелегированные. Для исследования сплавов с заданным содержанием сурьмы, но различным содержанием примеси одного сорта К. Г. Ивановым [42] был предложен метод роста монокристаллов в тонких трубках от затравок, размещенных в одном контейнере. Выращенные указанным методом кристаллы имеют минимальную плотность дислокаций.

Следует отметить, что свойства легированных кристаллов можно правильно описать, вводя коэффициенты отдачи $\eta = dn/dN$ [49], характеризующие изменение концентрации электронов одним атомом примеси, которые оказываются меньше единицы. Уменьшение коэффициентов эффективности примесей при повышении температуры [39] свидетельствует о том, что механизм их влияния на концентрацию носителей заряда отличается от поведения примесей в типичных полупроводниках и металлах. Недавние рентгенофазовые и электронно-микроскопические исследования, выполненные Ю. Т. Левицким с сотрудниками в Благовещенском педагогическом университете, показали, что нецелочисленная отдача электронов примесями может быть обусловлена образованием теллуридов и селенидов висмута в виде кластеров в матрице твердого раствора.

1.5. *Измерения коэффициентов теплового расширения кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма*

Данные исследования проведены в сотрудничестве с ФТИ им. А. Ф. Иоффе под руководством Г. А. Иванова. Были обнаружены различия коэффициентов теплового расширения кристаллов висмута, определенных по данным дилатометрических и рентгеноструктурных измерений. Дилатометрические измерения обнару-

живают температурный гистерезис, что связано с двойникованием кристаллов висмута и изменением количества двойников при нагревании и охлаждении.

1.6. *Измерение скоростей ультразвука и определение упругих постоянных в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма*

Измерение скоростей ультразвука производилось в зависимости от гидростатического давления до 10 ГПа с использованием методики создания гидростатического давления, разработанной в ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Измерялись скорости ультразвука для пяти различных кристаллографических ориентаций образцов кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма с содержанием сурьмы до 20 ат. % [16]. Это обеспечивало определение полного набора из шести независимых компонентов тензора модуля упругости второго порядка для анизотропных кристаллов типа висмута. Экспериментально установлено, что с увеличением давления и содержания сурьмы в сплавах все компоненты модуля упругости возрастают по закону, близкому к линейному. Однако анизотропия модуля упругости изменяется различным образом. Например, отношение C_{11}/C_{33} возрастает с увеличением содержания сурьмы в сплавах, но уменьшается с увеличением давления. Исследования закономерностей распространения ультразвука в кристаллах типа висмута под давлением были продолжены в Барнаульском государственном университете Ю. Г. Воровым, А. М. Джумиго, Ю. П. Мироновым.

2. Явления переноса в кристаллах типа висмута

2.1. *Влияние двойниковых прослоек на явления переноса в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма*

Для исследований [35, 36] двойники вводились в кристалл методом механической нагрузки. Были измерены удельное сопротивление, коэффициенты Холла, магнитосопротивления, термоэдс, а также получены угловые диаграммы магнитосопротивления и магнитотермоэдс [34]. Установлено, что анизотропия удельного сопротивления, коэффициента Холла и термоэдс уменьшается при увеличении содержания двойников. Угловые диаграммы магнитосопротивления и магнитотермоэдс указывают на существенное увеличение анизотропии этих эффектов в магнитном поле. Таким образом, двойники существенно влияют на величину и анизотропию коэффициентов переноса и других физических свойств, и для получения достоверной информации о физических свойствах кристаллов типа висмута необходимо использование бездвойниковых кристаллов, к которым относятся все приведенные ниже результаты.

2.2. *Электрические и гальванотермомагнитные явления в кристаллах висмут-сурьма*

Измерения коэффициентов переноса были выполнены стационарными методами с применением на современном этапе — для управления экспериментом, сбора и обработки данных — ЭВМ. Следует отметить большой вклад в исследование явлений переноса в кристаллах типа висмута в широком интервале температур и магнитных полей лаборатории полуметаллов ИПФ АН Молдовы под руководством Д. В. Гицу. Основные результаты отражены в монографии [14]. Поэтому здесь остановимся на явлениях и закономерностях, исследованных или получивших объяснение сравнительно недавно. К ним можно отнести, например, проблему температурной зависимости коэффициентов переноса.

Поверхность Ферми в кристаллах висмута состоит из трех электронных квазиэллипсоидальных замкнутых участков с центрами, локализованными в точках L зоны Бриллюэна, и одного дырочного квазиэллипсоида вращения, локализованного в точках T зоны Бриллюэна. В кристаллах висмут-сурьма, во всем диапазоне

составов, структура зоны проводимости вблизи уровня химического потенциала сохраняется, а в валентной зоне в зависимости от состава становятся актуальными T, L и H-экстремумы.

Здесь укажем, что Г. А. Ивановым был предложен метод экспериментального исследования коэффициентов переноса в кристаллах типа висмута, легированных донорными примесями до состояния, когда в явлениях переноса принимают участие только электроны зоны проводимости и упрощается расчет концентрации и подвижности электронов [40, 41]. Было установлено, что концентрация электронов возрастает прямо пропорционально содержанию донорных примесей и практически не зависит от температуры, а подвижности уменьшаются обратно пропорционально как концентрации носителей заряда, так и температуре [28]. Полученные соотношения между подвижностями слабо изменяются при изменении содержания легирующих примесей и температуры, и их можно считать справедливыми и для нелегированных кристаллов. Это позволяет определить концентрации и подвижности носителей заряда в нелегированных кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма [15, 46].

Наблюдаемые температурные и концентрационные зависимости подвижностей носителей заряда в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма в области рассеяния носителей заряда на фононах указывают на проявление недавно установленной общей закономерности в зависимости удельного сопротивления полуметаллов висмута, сурьмы и мышьяка от приведенной температуры (T/θ) [29], аналогичной известному закону Блоха—Грюнайзена для металлов, но отличающейся от него по виду. Установленная закономерность проявляется наиболее четко при $T > \theta$, в области преобладания межэкстремумного (междолинного, рекомбинационного, межзонного) рассеяния носителей заряда с участием фононов в полуметаллах со сложной зонной структурой, и обусловлена ограничениями, накладываемыми законом сохранения квазиимпульса на межэкстремумные переходы носителей заряда с участием фононов. В соответствии с установленной закономерностью в системе сплавов висмут-сурьма в области фононного рассеяния подвижность носителей заряда также принимает максимальные значения при минимальной концентрации носителей заряда [26, 37]. О существенной роли рекомбинационных процессов в явлениях переноса в полуметаллах свидетельствует также большая величина вклада биполярной диффузии носителей заряда в теплопроводность висмута [32] и сплавов висмут-сурьма [17].

Принципиально новые результаты были получены при экспериментальном исследовании термоэдс. Впервые был установлен переход термоэдс от анизотропной к изотропной при легировании донорными примесями кристаллов висмута [13, 27] и сплавов висмут-сурьма [17]. По появлению анизотропии термоэдс при возрастании уровня легирования кристаллов висмут-сурьма обнаружен дополнительный экстремум носителей заряда с симметрией, подобной симметрии T-экстремума валентной зоны висмута. Впервые была обнаружена двойная смена знака термоэдс с минимумом в области отрицательных значений в легированных акцепторными примесями олова кристаллах висмута [27] и сплавов висмут-сурьма [25] в зависимости от содержания примеси и температуры. Это обусловлено сложной структурой валентной зоны и межзонным рассеянием носителей заряда с участием фононов при электронно-топологических переходах в кристаллах типа висмута. Особенности с двойной сменой знака термоэдс были обнаружены также в легированных оловом и теллуром кристаллах сурьмы [6]. Аналогичное поведение термоэдс наблюдалось при исследовании влияния гидростатического давления на явления переноса в легированных оловом кристаллах висмут-сурьма

[11] методами, разработанными во ФТИ им. А. Ф. Иоффе [2, 3].

Экспериментальные исследования особенностей явлений переноса при электронно-топологических переходах в легированных кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма, обнаруженных в лаборатории Г. А. Иванова, были затем продолжены в лаборатории кинетических явлений ФТИ им. А. Ф. Иоффе до гелиевых температур [31, 52]. Было установлено, что в области гелиевых температур эти особенности обусловлены преимущественным рассеянием носителей заряда на различного типа дефектах.

Кинетическая природа особенностей термоэдс при электронно-топологических переходах в полуметаллах подтверждена расчетным анализом [4], а также экспериментально наблюдаемым исчезновением двойной смены знака термоэдс в магнитных полях, при которых эффективные подвижности носителей заряда различных групп стремятся к выравниванию. Однако количественное описание термоэдс требует знания закона дисперсии и закономерностей процессов рассеяния носителей заряда. При этом энергетический спектр носителей заряда целесообразно исследовать методами, не связанными с процессами рассеяния.

3. Закон дисперсии носителей заряда L-экстремумов в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма

Теоретические исследования закона дисперсии носителей заряда в кристаллах типа висмута (наличие малого энергетического зазора при существенной неквадратичности) позволили получить его в общем виде [10, 57]. При определенных предположениях из общего выражения для закона дисперсии носителей заряда L-экстремумов следуют более простые модели Шенберга [54], Лэкса [56], Абрикосова—Фальковского [1] или упрощенная модель Коэна [55]. Теоретические результаты нашли экспериментальное подтверждение в исследованиях эффекта Шубникова—де Гааза в нелегированных и слаболегированных кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма [5, 7].

3.1. *Магнитная восприимчивость кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма*

Для исследования закона дисперсии носителей заряда при изменении энергии в широком интервале были применены методы исследования магнитной восприимчивости и спектров плазменного отражения. Кристаллы типа висмута являются диамагнетиками с аномально большой и сильно анизотропной магнитной восприимчивостью [54]. Экспериментальные исследования магнитной восприимчивости кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма, включая легированные донорными и акцепторными примесями, были выполнены модернизированным методом Гуи с применением ЭВМ для считывания и обработки данных [45]. Полученные экспериментальные результаты позволили уточнить положения экстремумов зон при $T > 77$ К [18, 22, 38] и сделать выводы, что при энергиях порядка сотен мэВ закон дисперсии носителей заряда L-экстремумов приближается к квадратичному. Однако трудность выделения вклада носителей заряда и относительно слабое изменение магнитной восприимчивости при высоких уровнях легирования (до 0,3 ат. %) не обеспечивают достаточной возможности для количественного изучения закона дисперсии носителей заряда в широкой области энергий. Поэтому в качестве основного метода исследования закона дисперсии носителей заряда L-экстремумов было выбрано экспериментальное измерение спектров плазменного отражения.

3.2. *Спектры плазменного отражения кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма*

Для исследования спектров плазменного отражения использовались спектральные приборы ИКС-21, ИКС-22В, длинноволновый инфракрасный спектро-

метр ДИВС. Основная часть исследований выполнена в сотрудничестве с объединением «Электрон» на фурье-спектрометре IFS-113 V фирмы «Брукер» (ФРГ), представляющем собой единую механико-оптико-электронно-вычислительную систему.

Впервые были измерены спектры плазменного отражения плоско поляризованного излучения для образцов кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма от плоскостей, содержащих ось C_3, при произвольной ориентации плоскости поляризации относительно оси C_3. Эти спектры имели два четко выраженных минимума на различных частотах и переходили в один из простых спектров с одним минимумом при векторе напряженности электрического поля волны $E \perp C_3$ и $E \parallel C_3$. При угле между указанными направлениями в 45^0 экспериментальный спектр представлял собой полусумму спектров для ориентаций $E \perp C_3$ и $E \parallel C_3$ [47].

Исследования показали, что в спектрах отражения нелегированных кристаллов висмут-сурьма обнаруживаются отклонения от теории Друде, которые обусловлены влиянием межзонных переходов, когда энергия фотона приближается к энергии межзонного перехода [53].

При легировании кристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма донорными примесями теллура достигается состояние, при котором в плазменные эффекты вносят вклад только электроны L-экстремумов зоны проводимости. Возрастание концентрации носителей заряда вследствие легирования приводит к тому, что энергия межзонного перехода существенно превосходит энергию фотона, так что спектры имеют четко выраженные минимумы и хорошо описываются теорией свободных электронов Друде [30]. По данным плазменных частот и холловской концентрации носителей заряда [23, 24] были вычислены эффективные массы L-электронов m_{11} и m_{33} в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма. Результаты показывают, что эффективные массы m_{11} и m_{33} при увеличении концентрации носителей заряда и их энергии стремятся к насыщению. При этом закон дисперсии L-электронов в зоне проводимости висмута и сплавов висмут-сурьма в пределе больших концентраций и энергий переходит к квадратичному. Было показано, что в широком интервале энергий этот закон хорошо описывается моделью Макклюра и Чоя, и определены ранее неизвестные значения коэффициентов закона дисперсии. Исследования плазменного отражения были продолжены А. П. Чувохиным и А. С. Мальцевым в Коми педагогическом университете, а также Н. П. Степановым в Читинском педагогическом университете. В настоящее время широко исследуется эффект магнетоотражения К. Г. Ивановым в СПбГУТД, О. В. Кондаковым, С. В. Бровко и А. В. Зайцевым в Елецком государственном университете.

4. Термоэлектрические свойства материалов на основе сплавов висмут-сурьма

Отметим, прежде всего, что детальные исследования термоэлектрической и магнитотермоэлектрической эффективности кристаллов висмут-сурьма, а также анизотропной термоэлектрической эффективности легированных оловом кристаллов висмута были выполнены под руководством и при непосредственном участии Г. А. Иванова [33, 51]. Исследование закона дисперсии и процессов релаксации носителей заряда в висмуте и сплавах висмут-сурьма позволили дать объяснение наблюдаемым закономерностям поведения термоэлектрической эффективности [21]. Кристаллы висмут-сурьма в интервале температур 100–140 К обеспечивают достижение рекордных значений термоэлектрической эффективности $Z = 6 \cdot 10^{-3}$ K^{-1} и в магнитном поле — $Z = 9 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}, что позволяет их использовать в качестве n-ветви термопары в сочетании с p-ветвью на основе соединения Bi_2Te_3 в верхних каскадах термобатарей [19].

На анизотропных термоэлементах из монокристаллического висмута Н. П. Дивиным и Г. А. Ивановым разработан уникальный микрокалориметр. А также разработана методика измерения теплоемкости и надежно измерены малый скачок теплоемкости при переходе в сверхпроводящее состояние высокотемпературных сверхпроводников [43] и теплоемкость в области фазовых переходов в сегнетоэлектриках.

Следует отметить большой вклад лично Г. А. Иванова в разработку методов расчета и создание новых конструкций термоэлементов, в частности, с преимущественно боковым отводом тепла.

Исследования в области физики полуметаллов продолжаются школой Г. А. Иванова как в РГПУ им. А. И. Герцена, так и во многих вузах и научных центрах России и других стран. В статье не было возможности отметить все исследования.

О большом объеме и высоком научном уровне исследований школы свидетельствует тот факт, что на научной конференции, посвященной памяти профессора Г. А. Иванова, в РГПУ им. А. И. Герцена в феврале 2002 г. участниками научной школы было представлено более 40 докладов, относящихся к исследованиям в области физики полуметаллов и узкозонных полупроводников [12].

5. Педагогическая деятельность Г. А. Иванова

Наряду с научной деятельностью Г. А. Иванов большое внимание уделял учебно-педагогической и научно-методической работе, совершенствованию учебного процесса, в частности, подготовке будущих учителей физики в области физического эксперимента, повышению научно-методического уровня преподавания. Он внес существенный вклад в создание профессиограммы учителя физики, разработал принципиально новый учебный план подготовки учителей на основе единого учебного курса физики, внедрил в практику работы факультета новую эффективную форму организации госэкзамена по физике. Под его руководством на кафедре были модернизированы и созданы новые учебные лаборатории по физике твердого тела, физике ядра, квантовой оптике и атомной физике, была разработана и внедрена в учебный процесс система учебно-исследовательских заданий по всем разделам курса общей физики. Он является автором практикумов по физике твердого тела и атомной физике, учебного пособия по физике полупроводников, изданного на русском, а также на французском и казахском языках, учебного пособия по атомной и молекулярной физике. Большое внимание Г. А. Иванов уделял пропаганде научных знаний, повышению научного уровня подготовки учителей физики. Научные работы, выполненные студентами на кафедре общей и экспериментальной физики, неоднократно отмечались на городском конкурсе дипломами.

За период работы Г. А. Иванова факультет выпустил около 4000 учителей. Этот вклад Г. А. Иванова в подготовку учителей школы многократно умножается работой его многочисленных учеников и последователей во многих педагогических вузах страны. За вклад в развитие народного образования в 1971 году Г. А. Иванов был награжден орденом «Знак почета».

Г. А. Иванов воспитал трех сыновей, один их которых стал военно-морским офицером, двое других пошли по стопам отца.

До последнего дня своей жизни Г. А. Иванов много и увлеченно работал — писал статьи, изобретал, занимался расчетом термоэлектрических преобразователей энергии.

Неистощимое богатство идей, творческий энтузиазм, доброжелательность и бескорыстное отношение к людям оставили светлую память в сердцах всех людей, которые знали Г. А. Иванова и с ним работали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Абрикосов А. А., Фальковский Л. А.* Теория электронного энергетического спектра металлов с решеткой висмута // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 1089–1101.

2. *Аверкин А. А., Богомолов В. Н.* Автономная камера высокого давления // ПТЭ. 1972. № 3. С. 224–225.

3. *Аверкин А. А., Воров Ю. Г., Иванов Г. А., Коришев В. И., Регель А. Р.* О зоне тяжелых электронов проводимости в висмуте // ФТТ. 1972. Т. 14. С. 1136–1139.

4. *Бондаренко М. Г., Грабов В. М., Урюпин О. Н.* Магнитосопротивление и магнитотермоэдс в легированных оловом висмуте и сплавах висмут-сурьма при существенной роли межзонного рассеяния // Физика твердого тела: Материалы межвуз. науч. конф. — Барнаул, 1982. С. 57–58.

5. *Брандт Н. Б., Герман Р., Голышева Т. И., Девяткова Л. И., Кусник Д., Краак В., Пономарев Я. Г.* Электронная поверхность Ферми у полуметаллических сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$ (0. 23 < x < 0. 56) // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. С. 2152–2169.

6. *Бубнов Ю. А., Грабов В. М.* Изменение анизотропии кинетических явлений в сурьме и сплавах сурьма-висмут в зависимости от степени легирования донорными и акцепторными примесями // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы V Всесоюзного симпоз. — Львов, 1980. Ч. II. С. 247–249.

7. *Буянова Е. П., Евсеев В. В., Иванов Г. А., Миронова Г. А., Пономарев Я. Г.* Определение параметров закона дисперсии носителей полупроводниковых сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$ n-типа // ФТТ. 1975. Т. 20. С. 1937–1946.

8. *Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А., Долинская Н. Ю., Марычев В. В.* Исследование условий получения монокристаллов висмута и сплавов висмут-сурьма // Изв. АН СССР. Металлы. 1973. Т. 6. С. 57–63.

9. *Вол А. Е.* Строение и свойства двойных металлических систем. — М., 1963. Т. 2. С. 223.

10. *Волков Б. А., Фальковский А. А.* Электронная структура полуметаллов группы V // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. С. 2135–2151.

11. *Воров Ю. Г., Грабов В. М., Иванов Г. А., Петропавловский М. Д.* Влияние давления на кинетические параметры висмута и сплавов висмут-сурьма, легированных акцепторными примесями // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы V Всесоюзного симпоз. — Львов, 1980. Ч. 1. С. 245–246.

12. Физика полупроводников и полуметаллов (ФПП—2002): Всероссийская науч. конф. 4–6 февраля 2002 г. Программа. — СПб., 2002.

13. *Гицу Д. В., Иванов Г. А., Попов А. М.* О термоэлектродвижущей силе в висмуте и его сплавах с теллуром // ФТТ. 1962. Т. 4. С. 22–28.

14. *Гицу Д. В., Канцер В. Г., Голбан И. М., Мунтяну Ф. М.* Явления переноса в висмуте и его сплавах. — Кишинев, 1983.

15. *Глухова Т. И., Грабов В. М., Иванов Г. А., Попов А. М.* Электрические свойства квазибинарных сплавов (Bi-Sb)-Te // Уч. зап. ЛГПИ им. А. И. Герцена. 1965. Т. 265. С. 234–241.

16. *Грабов В. М., Давыдов А. С., Миронов Ю. П., Джумиго А. М.* Упругие свойства и силы связи в полуметаллах V группы и их сплавах // ФТТ. 1985. Т. 27. С. 2017–2024.

17. *Грабов В. М., Иванов Г. А, Понарядов В. С.* Термоэдс и теплопроводность сплавов висмут-сурьма, легированных теллуром // ФТТ. 1970. Т. 12. С. 267–272.

18. *Грабов В. М., Иванов Г. А., Иванов К. Г., Суровцев А. Н.* Магнитная восприимчивость сплавов висмут-сурьма, легированных оловом и свинцом // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы IV Всесоюзного симпоз. — Львов, 1975. Ч. IV. С. 31–35.

19. *Грабов В. М., Иванов Г. А., Мунтян С. П.* Микроохладитель Нернста // Полуметаллы и узкозонные полупроводники под влиянием внешних воздействий. — Кишинев, 1983. С. 151–172.

20. *Грабов В. М., Иванов Г. А., Налетов В. Л., Овсянов В. М., Парахин А. С.* О двух типах двойников в кристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1982. Т. 18. С. 33–37.

21. *Грабов В. М., Иванов Г. А., Налетов В. Л., Панарин А. Ф.* Межэкстремумное рассеяние носителей заряда и термоэлектрическая эффективность сплавов висмут-сурьма // Полупроводниковые материалы для термоэлектрических преобразователей. — Л., 1985. С. 30–31.

22. *Грабов В. М., Иванов К. Г.* Магнитная восприимчивость сплавов висмут-сурьма, легированных оловом // ФТТ. 1974. Т. 16. С. 3153–3154.

23. *Грабов В. М., Кудачин В. В., Мальцев А. С.* Анизотропия плазменного отражения и закон дисперсии электронов в сплавах висмут-сурьма, легированных донорными примесями // Полупро-

водники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы VII Всесоюзного симпоз. — Львов, 1986. Ч. 2. С. 167–169.

24. *Грабов В. М., Мальцев А. С.* Анизотропия плазменного отражения и закон дисперсии электронов в висмуте, легированном донорными примесями // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы VI Всесоюзного симпоз. — Львов, 1983. С. 231–232.

25. *Грабов В. М., Панарин А. Ф., Худякова И. И.* Влияние межзонного рассеяния на явления переноса в висмуте и сплавах висмут-сурьма, легированных акцепторными примесями // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы V Всесоюзного симпоз. — Львов, 1980. Ч. 1. С. 217–220.

26. *Грабов В. М., Яковлева Т. А.* Рекомбинационное рассеяние и зависимость подвижностей носителей заряда в сплавах висмут-сурьма от их состава // Физика твердого тела: Материалы межвуз. конф. — Барнаул, 1982. С. 36–37.

27. *Грабов В. М., Иванов Г. А.* О поведении дифференциальной термоэдс в сплавах висмута // ФТТ. 1966. Т. 8. С. 2460–2461.

28. *Грабов В. М.* Закономерности межэкстремумного рассеяния носителей заряда в полуметаллах // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Материалы VII Всесоюзного симпоз. — Львов, 1986. Ч. 2. С. 194–196.

29. *Грабов В. М.* Общие закономерности в температурной зависимости удельного сопротивления полуметаллов // Материалы для термоэлектрических преобразователей: Тез. докл. III Межгосударственного семинара. — СПб., 1993. С. 42–43.

30. *Гроссе П.* Свободные электроны в твердых телах. — М., 1982.

31. *Грязнов О. С., Иванов Г. А., Мойжес Б. Я., Наумов Б. Н., Немчинский В. А., Родионов Н. А., Редько Н. А.* Влияние межзонного механизма рассеяния на кинетические явления в p-$Bi_{1-x}Sb_x$ // ФТТ. 1982. Т. 24. С. 2335–2343.

32. *Иванов Г. А., Грабов В. М.* О теплопроводности и законе Видемана-Франца в висмуте и его сплавах // Уч. зап. ЛГПИ им. А. И. Герцена. 1965. Т. 265. С. 254–263.

33. *Иванов Г. А., Куликов В. А., Налетов В. Л., Панарин А. Ф., Регель А. Р.* Термоэлектрическая добротность чистых и легированных сплавов висмут-сурьма в магнитном поле // ФТП. 1972. Т. 6. С. 1295–1300.

34. *Иванов Г. А., Левицкий Ю. Т., Ланкин С. В., Налетов В. Л.* Диаграммы вращения магнитосопротивления и магнитотермоэдс двойниковых кристаллов висмута // ФММ. 1981. Т. 52. С. 200–203.

35. *Иванов Г. А., Левицкий Ю. Т., Ланкин С. В., Налетов В. Л.* Влияние двойников на электрические и гальваномагнитные свойства висмута // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 2547–2549.

36. *Иванов Г. А., Левицкий Ю. Т., Налетов В. Л., Ланкин С. В.* Влияние двойников на явления переноса в висмуте // ФММ. 1976. Т. 41. С. 763–765.

37. *Иванов Г. А., Попов А. М.* Электрические свойства сплавов висмут-сурьма // ФТТ. 1963. Т. 5. С. 2409–2419.

38. *Иванов Г. А., Суровцев А. Н.* Сравнение действия олова и свинца на зонную структуру висмута // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 3412–3414.

39. *Иванов Г. А., Чистяков Б. И.* Электрические свойства тройных сплавов висмута в интервале температур 77–450 К // ФММ. 1963. Т. 16. С. 848–857.

40. *Иванов Г. А.* К расчету концентрации и подвижности носителей тока в висмуте // ФТТ. 1964. Т. 6. С. 938–940.

41. *Иванов Г. А.* Электрические свойства монокристаллов твердых растворов теллура в висмуте в интервале температур 77–300 К // ФТТ. 1963. Т. 5. С. 3173–3178.

42. *Иванов К. Г., Крылов А. С., Калугина И. К.* Выращивание монокристаллов висмут-сурьма // ПТЭ. 1975. № 2. С. 225–226.

43. *Иванов Ю. В., Петров Д. В., Грабов В. М., Лужковский А. В., Гасумянц В. Э.* Влияние неоднородности образца и флуктуаций параметра порядка на теплоемкость $YBa_2Cu_3O_x$ вблизи сверхпроводящего перехода // СФХТ. 1994. Т. 7. С. 48–61.

44. *Колпачников Г. Н., Налетов В. Л.* Выращивание монокристаллов Bi-Sb методом зонной перекристаллизации // Уч. зап. ЛГПИ им. А. И. Герцена. 1968. Т. 384. Вып. 4. С. 3–6.

45. *Коришев В. И., Лужковский В. Г.* Установка для измерения магнитной восприимчивости // XXIV Герценовские чтения. Физика. — Л., 1971. С. 80–82.

46. *Левицкий Ю. Т., Иванов Г. А.* Высокотемпературные исследования электрических и гальваномагнитных свойств сплавов Bi-Sb // ФММ. 1969. Т. 28. С. 804–812.

47. *Мальцев А. С., Грабов В. М., Кухарский А. А.* Особенности спектров плазменного отражения анизотропных кристаллов // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 58. С. 927–929.

48. *Михайличенко Т. В., Налетов В. Л., Рощин В. В.* Исследование диаграммы состояний сплавов висмут-сурьма, богатых висмутом //Уч. зап. ЛГПИ им. А. И. Герцена. 1968. Т. 384. Вып. 4. С. 12–16.

49. *Мокиевский Л. И., Иванов Г. А.* Электрические свойства сплавов висмута. III. Тройные сплавы, «возвращенные» к свойствам висмута // ЖТФ. 1957. Т. 28. № 11. С. 1695–1706.

50. *Овсянов В. М., Налетов В. Л.* Вероятность блочной структуры монокристаллов висмута, выращенных от различно ориентированных затравок // Физика твердого тела: Материалы межвуз. конф. — Барнаул, 1984. С. 6–8.

51. *Регель А. Р., Иванов Г. А., Грабов В. М., Анатычук Л. И., Лусте О. Я.* Материал для анизотропных термоэлементов. А. С. № 245859 СССР от 3 апреля 1969 г.

52. *Родионов Н. А., Иванов Г. А., Редько Н. А.* Аномальное поведение температурной зависимости термоэдс дырок в полупроводниковых сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ // ФТТ. 1979. Т. 23. С. 2110–2115.

53. *Степанов Н. П., Грабов В. М., Вольф Б. Г.* Влияние межзонного перехода на затухание плазменных колебаний в сплавах висмут-сурьма // ФТП. 1989. Т. 23. С. 1312–1314.

54. *Шенберг Д.* Магнитные осцилляции в металлах. — М., 1986.

55. *Cohen M. H.* Energy band in the Bismuth Structure. I. A Nonellipsoidal Model for Electron in Bi // Phys. Rev. Vol. 121. P. 387–395.

56. *Lax B., Movroides J. G., Zeiger H. J.* A simple nonparabolic model for electrons in bismuth // Rev. Modern Phys. 1956. Vol. 30. P. 122–129.

57. *Macclure J. W., Choi K. H.* Energy Band Model and Properties of Electrons in Bismuth // Solid State Commun. 1977. Vol. 21. P. 1015–1018.

V. Grabov

PROFESSOR G. A. IVANOV AND HIS SCHOOL

The paper is devoted to the memory of professor G.A. Ivanov — a renown scientist, a specialist in the field of solid state physics, a teacher, the chairperson of General and Experimental Physics Department at Herzen State Pedagogical University of Russia, an organizer of a field of research and of a scientific school in the field of physics of semimetals and narrow gap semiconductors. The characteristics of his scientific and pedagogical activities is given. The review of the main scientific achievements of Prof. G. A. Ivanov and his scientific school is presented.