

УДК 621.315.592

Начальные этапы становления полупроводниковой электроники в СССР (К 60-летию открытия транзистора) Обзор

© В.И. Стафеев[¶]

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное объединение „Орион“»,
111123 Москва, Россия

(Получен 8 сентября 2009 г. Принят к печати 15 сентября 2009 г.)

Приведены наиболее важные ранние исследования и разработки российских ученых по физике и технике полупроводников и полупроводниковых приборов, в том числе мало известные до настоящего времени, сыгравшие важную роль в становлении полупроводниковой электроники в СССР.

1. Введение

Рождение полупроводниковой электроники принято отсчитывать со времени открытия транзисторов: 1948 г. — точечно-контактные транзисторы, 1949 г. — плоскостные транзисторы.

Фактически полупроводниковые приборы были созданы и широко использовались за десятки лет до появления транзисторов. Фотоэлектрические явления в полупроводниках были открыты еще в XIX веке. Были созданы первые фотоэлементы на основе селена. В полупроводниковых структурах была обнаружена нелинейность вольт-амперных характеристик и были созданы полупроводниковые выпрямители на основе селена и закиси меди. В начале XX века были созданы и получили широкое практическое применение детекторы электромагнитных излучений с использованием прижимного металлического острия к полупроводнику.

В связи с 60-летием открытия транзистора основное внимание в данной статье уделено начальным „этапным“ работам, сыгравшим важную роль в формировании полупроводниковой электроники. Особое внимание уделено описанию проводившихся в СССР в закрытом порядке исследований и разработок, которые и до сих пор малоизвестны научной общественности [1,2].

Широкий комплекс оригинальных исследований полупроводников и разработок приборов на их основе провел в 1920–1930 гг. О.В. Лосев [3]. В 1922–1924 гг. в Нижегородской радиолaborатории при исследовании прижимных точечно-контактных детекторов на кристаллах карбида кремния О.В. Лосев обнаружил в их вольт-амперной характеристике отрицательное дифференциальное сопротивление и создал полупроводниковый детектор-усилитель и детектор-генератор электромагнитных излучений на частоты до десятков МГц. На этой основе впервые в мире было создано детекторное приемопередаточное устройство — кристадин, вызвавшее большой интерес как в нашей стране, так и за рубежом.

[¶] E-mail: orion@orion-ir.ru

В 1927 г. О.В. Лосев открыл излучение света в карбидокремниевом точечно-контактном детекторе при приложении электрического смещения в пропускном направлении. Приоритет О.В. Лосева в открытии рекомбинационного излучения признан мировой научной общест­венностью. В США этот эффект получил название „Losev-light“.

В 1932–1933 гг. в Ленинграде О.В. Лосев подробно исследовал фоторезистивный эффект во многих полупроводниковых материалах. Им, в частности, была показана высокая фоточувствительность фоторезисторов на основе PbS. В конце 1930-х годов высокочувствительные фоторезисторы на основе PbS были разработаны в Германии и нашли большое применение во время Второй мировой войны. Они и до сих пор являются одними из самых широко применяемых фоторезисторов инфракрасного (ИК)-диапазона, особенно в головках самонаведения и в космических системах раннего обнаружения запусков ракет.

В 1930–1949 гг. в нашей стране был проведен широкий комплекс теоретических и экспериментальных исследований процессов в контактах металл–полупроводник–барьеры Шоттки и в контактах разных полупроводников, в том числе полупроводников с разным типом проводимости, названных позднее *n–p*-переходами (А.Ф. Иоффе, Я.И. Френкель, И.К. Кикоин, Д.Н. Наследов, В.П. Жузе, В.Е. Лашкарёв, Б.И. Давыдов, А.И. Губанов и др.).

В.Е. Лашкарёв и К.М. Косаногов в 1941 г. показали, что выпрямление в детекторах на основе структур (окисел меди)–(закись меди)–купросы определяется гетероконтактом полупроводников *n*- и *p*-типов проводимости [4]. Модель с использованием структуры с *p–n*-переходом для объяснения выпрямления в селеновых выпрямителях предлагалась Д.Н. Наследовым и Г.Б. Абдуллаевым. Несмотря на многочисленные исследования, теория функционирования полупроводниковых выпрямителей на основе закиси меди и селена в течение многих лет не была создана.

Наиболее последовательная теория выпрямления тока на контакте разных полупроводников была разработана сотрудником ФТИ АН СССР Б.И. Давыдовым в 1938 г. Б.И. Давыдов рассмотрел прохождение тока в диодных структурах полупроводников, в том числе с разным типом проводимости, названных позднее $n-p$ -переходами. В развитой Б.И. Давыдовым теории [5] учтен переход неравновесных носителей через возникающий барьер — инжекция неосновных носителей с последующей их рекомбинацией в базовых областях структуры. Величины обратных токов, рассчитанные по теории Б.И. Давыдова, были на много порядков меньше наблюдаемых в существовавших в то время выпрямителях на основе закиси меди и селена. Как показали последующие исследования, на протекание тока в выпрямителях в таких широкозонных полупроводниках явление инжекции не оказывало заметного влияния. Оно определяется процессами в слое объемного заряда $n-p$ -перехода. По указанной причине эти работы Б.И. Давыдова были практически забыты.

2. Точечно-контактные детекторы сверхвысокочастотного диапазона

Во второй половине XIX века было обнаружено, что проводимость порошков электропроводящих материалов при приложении электрического смещения может скачком изменяться из непроводящего состояния в проводящее. Обратный переход осуществляется при механическом встряхивании порошка, нарушающем возникший электрический контакт зерен. Помещенный в непроводящую трубку порошок использовался для детектирования электромагнитных излучений, в том числе и в громоотводах.

Такой порошковый детектор, названный когерером, в 1895 г. использовал А.С. Попов в своем макете беспроволочного телеграфа и в изобретенном им радио [6]. Когереры обладали низкой чувствительностью и низкой надежностью. В последующих исследованиях для регистрации высокочастотных электромагнитных излучений А.С. Попов использовал созданный им в 1900 г. точечно-контактный детектор на основе прижимного металлического зонда на полупроводниковом кристалле.

После создания электровакуумных детекторов интерес к точечно-контактным детекторам на некоторое время снизился.

В 1930-е годы были созданы радиолокационные устройства — радары, сыгравшие большую роль во время Второй мировой войны. Для приема отраженных сверхвысокочастотных (СВЧ) радиосигналов радаров потребовалась разработка и организация производства СВЧ детекторов. Существовавшие в то время электровакуумные детекторы не могли детектировать радиосигналы столь высоких частот. Поэтому интерес к точечно-контактным детекторам благодаря высокочастотным характеристикам вновь возрос. Для создания СВЧ детекторов для радаров были использованы контакты металлических зондов на монокристаллических пластинах кремния.

В СССР для развертывания работ по радиолокации были созданы специализированные научно-исследовательские и конструкторские организации ЦНИИ-108 (1943 г.), НИИ-160 (1943 г.), КБ-1 и др. Работы проводились в закрытом порядке, поэтому о проводимых в них работах информации в открытой печати практически не было в течение многих лет.

В СССР точечно-контактные СВЧ детекторы с „прижимным контактом“ металлического острия разработаны в ЦНИИ-108 (под руководством С.Г. Калашникова) и в НИИ-160 (под руководством А.В. Красилова) и было организовано их производство.

Однако „прижимные контакты“ недостаточно стабильны и надежны. Учитывая большую важность СВЧ детекторов, в ЦНИИ-108 была поставлена задача — разработать более надежные точечно-контактные СВЧ детекторы — НИР „Контакт“. За основу был принят вариант вварного точечного контакта на германии. Для детекторов нового типа потребовались монокристаллы германия, которые в то время в нашей стране еще отсутствовали и поэтому пришлось разрабатывать технологические методы и выращивать монокристаллы Ge с необходимыми электрофизическими параметрами. Образцы монокристаллов германия с требуемыми параметрами были получены и обеспечивали разработку нового типа СВЧ детекторов.

Позднее директор ЦНИИ-108 А.И. Берг добился поручения Правительства организовать разработку и производство монокристаллов германия в Гиредмете. Подключение Гиредмета к проблеме германия сыграло важную роль в дальнейшем развитии всей полупроводниковой электроники.

Разработка детекторов на основе вварного контакта на германии в ЦНИИ-108 была успешно проведена (см. [7]). Руководителю работ С.Г. Калашникову, его заместителю Н.А. Пенину и основным разработчикам В.Г. Алексеевой и Г.С. Кубецкому в 1951 г. была присуждена Сталинская премия. В НИИ-60 была успешно проведена разработка и организовано производство точечно-контактных СВЧ детекторов на основе кремния. Коллективу разработчиков во главе с А.В. Красиловым была присуждена Государственная Премия СССР.

Создание и организация серийного производства нового класса высоконадежных СВЧ детекторов сыграли важную роль в развитии радиолокационной техники в нашей стране.

3. Точечно-контактные выпрямители и транзисторы

Точечно-контактные транзисторы были созданы У. Браттейном и Д. Бардином на фирме Bell Telephone Labs в конце 1947 г. Открытие было сделано в процессе исследований свойств поверхности германия вблизи точечного контакта. Первая информация о создании транзисторов была опубликована в июле 1948 г. в газете New York Times и в журнале Physical Review.

После получения информации о создании в США полупроводниковых точечно-контактных транзисторов в организациях, занимавшихся исследованием поверхностных свойств полупроводников и разработкой точечно-контактных детекторов, ФИ АН СССР (Б.М. Вул, А.В. Ржанов), ЦНИИ-108 (С.Г. Калашников, Н.А. Пенин, директор А.И. Берг), НИИ-160 (А.В. Красилов), были начаты исследования и разработки точечно-контактных триодов.

Эти работы, как было принято в СССР в то время, проводились в закрытом порядке. Результаты исследований и разработок в течение многих лет в открытой печати не публиковались.

В ЦНИИ-108 в связи с большой загруженностью работами по разработке СВЧ детекторов серьезного внимания разработке точечно-контактных триодов уделить не смогли. Исследования проводил только Г.С. Кубецкий.

В ФИАНе в 1950 г. была поставлена НИР „Исследование электрофизических свойств германия и создание действующих макетов германиевых триодов“ (руководители Б.М. Вул и А.В. Ржанов). НИР была успешно выполнена и принята комиссией 18.12.1951 г. В заключении комиссии по приемке НИР, подписанном С.Г. Калашниковым, А.В. Красиловым и другими записано:

„Комиссия отмечает, что в ФИАНе впервые в СССР экспериментально осуществлен триодный эффект... а также изготовлены первые действующие макеты полупроводниковых триодов... Комиссия рекомендует: 1. Продолжить в 1952 г. в Гиредмете работу по получению высококачественного германия для триодов с привлечением заинтересованных организаций. 2. Выполнить в 1952 г. совместную научно-исследовательскую работу ФИАН и НИИ-160 по созданию германиевых триодов... 4. В процессе совместной работы НИИ-160 и ФИАН считать необходимым лабораторное изготовление в НИИ-160 партий действующих макетов триодов с достигнутыми характеристиками и передачу их в НИИ-695 и НИИ-885 МПСС начиная с 1-го квартала 1952 г.“¹

В НИИ-160 в это время основные силы коллектива А.В. Красилова были сосредоточены на разработке точечно-контактных СВЧ детекторов и организации их производства. Исследования по созданию точечно-контактных триодов были начаты в начале 1949 г. [8]. Работы проводились под научным руководством А.В. Красилова в рамках дипломных работ С.Г. Мадоян, а затем Ф.А. Щиголя [8].

В 1952 г. в НИИ-160 была поставлена ОКР „Точка“ со сроком окончания в третьем квартале 1953 г. После перехода в него в начале 1953 г. коллектива А.В. Красилова [9] ОКР была продолжена в НИИ-35. Богатый технологический опыт позволил успешно завершить разработку промышленной технологии точечно-контактных триодов и организовать их серийное производство. В работах по точечно-контактным триодам

¹ Приношу благодарность В.М. Березанской за предоставление материалов о работах в ФИАНе.

в НИИ-35 позднее приняли участие Я.А. Федотов и Г.С. Кубецкий, перешедшие из ЦНИИ-108. В начале 1954 г. Я.А. Федотов на точечно-контактных триодах изготовил приемник для выходного каскада УНЧ.

Точечно-контактные приборы наряду с большими по сравнению с вакуумными лампами достоинствами имели очевидные недостатки (недостаточная стабильность, низкие рабочие мощности и др.). Низкие токи точечно-контактных диодов в пропускном направлении существенно снижали их использование в выпрямительных устройствах. Эти недостатки ограничивали возможности их практического применения, особенно в аппаратуре оборонного назначения.

4. Плоскостные диоды и триоды

Первые плоскостные полупроводниковые выпрямители, как отмечалось выше, были созданы в начале XX века на основе закиси меди и селена. Плоскостные диоды и транзисторы на основе германия с $p-n$ -переходами были предложены и разработаны на фирме Bell Telephone Labs в 1949 г.

Работа В. Шокли „Теория плоскостных $p-n$ -переходов в полупроводниках и $p-n$ -транзисторов“ опубликована в 1949 г. [10]. Рассчитанные по теории В. Шокли токи и характеристики $p-n$ -переходов оказались близкими к рассчитанным по теории Б.И. Давыдова и количественно совпадали с результатами экспериментальных исследований диодов на основе германия. В СССР первая статья по полупроводниковым триодам была направлена в журнал „Вестник информации“ А.В. Красиловым в сентябре 1949 г.

В нашей стране в развертывании работ по полупроводниковым приборам большую роль сыграл А.И. Берг, бывший в то время заместителем министра обороны. 4 сентября 1952 г. было подписано Постановление Совета Министров СССР о проведении НИР „Разработка германиевых диодов и триодов, заменяющих маломощные радиолампы“ (шифр „Плоскость“) со сроком окончания в третьем квартале 1953 г. Проведение НИР поручалось ФТИ АН СССР, ФИ АН СССР, ЦНИИ-108 и НИИ-160. Гиредмет был привлечен для разработки технологии и организации производства высококачественных монокристаллов германия.

В Гиредмете разработка технологии германия проводилась под руководством Н.П. Сажина. Позднее эти работы возглавили Э.П. Бочкарев и Б.И. Головин, перешедший из НИИ-35. Однако на начальных этапах ЦНИИ-108, ФТИ АН СССР и ФИ АН СССР были вынуждены проводить свои разработки на монокристаллах германия, выращиваемых самостоятельно. В разработку технологии и метрики заметный вклад внесли ФИ АН СССР, ЦНИИ-108 и ФТИ АН СССР.

Поставка монокристаллов германия хорошего качества, но небольшого диаметра, была начата Гиредметом уже в 1953 г. Совершенствование технологии с целью улучшения электрофизических параметров и увеличения

размеров монокристаллов в Гиредмете продолжалось и в последующие годы. Разработка и организация производства германия обеспечили в дальнейшем разработку и организацию серийного производства полупроводниковых диодов и триодов.

Физико-технический институт АН СССР был организован А.Ф. Иоффе в 1918 г. и стал основным научным центром по исследованию полупроводников и созданию полупроводниковых приборов. В нем сформировался крупный научный коллектив, широко развернулись исследования явлений и свойств полупроводников, разработка и исследования новых полупроводниковых материалов и их практическое применение.

Работы по точечно-контактным СВЧ детекторам и точечно-контактным полупроводниковым триодам в ФТИ АН СССР практически не проводились.

В 1950–1952 гг. вместе с А.Ф. Иоффе из ФТИ АН СССР в созданную им Лабораторию по полупроводникам при президиуме АН СССР ушли многие ведущие ученые и специалисты. Позднее на основе этой Лаборатории был создан Институт полупроводников АН СССР (г. Ленинград).

Д.Н. Наследов после возвращения в ФТИ АН СССР на должность заместителя директора по науке в 1947 г. сформировал полупроводниковую лабораторию по новым направлениям полупроводниковой науки и техники в составе нескольких секторов.

Сектор В.М. Тучкевича подключился к разработке методов выращивания монокристаллов германия, исследованию его свойств и созданию $p-n$ -переходов, полупроводниковых диодов и триодов на его основе. К моменту выхода в 1952 г. Постановления Правительства по НИР „Плоскость“ в секторе В.М. Тучкевича уже сформировался коллектив специалистов и был создан значительный научно-технологический задел.

Руководителем НИР „Плоскость“ был назначен В.М. Тучкевич, основные исполнители [11]: А.А. Лебедев, Н.М. Мокровский, В.К. Субашиев, А.И. Уваров, Н.С. Яковчук. Ж.И. Алфёров приступил в работе в январе 1953 г. В рамках выполнения НИР „Плоскость“ в ФТИ проведены следующие разработки.

Разработаны технологические методы изготовления $p-n$ -переходов и триодов. Вначале $p-n$ -переходы изготавливались методом выращивания из расплава, затем была разработана и использовалась технология их формирования методом сплавления индия в германий n -типа. В настоящее время аналогичный метод называется „жидкостная эпитаксия“. В мае 1953 г. созданы первые плоскостные диоды и триоды (Ж.И. Алфёров) [11]. Созданные диоды обеспечивали прохождение прямых токов до 0.5 А и выдерживали обратные смещения до 400 В. Триоды на частоте 1 кГц имели коэффициент усиления по мощности более 15 000 при выходной мощности более 100 мВт. Основные разработки диодов и триодов были проведены на выращенных в ФТИ монокристаллах германия (Н.М. Мокровский, А.А. Лебедев). Позже использовались и монокристаллы, поставляемые Гиредметом. Разработаны

методы измерения параметров и созданы измерительные стенды, проведены исследования и испытания созданных диодов и триодов (В.К. Субашиев, А.И. Уваров, Н.С. Яковчук).

На основе изготовленных приборов были разработаны первые в стране радиоприемники (Н.С. Яковчук), которые демонстрировались в июне 1953 г. в ЦК партии и в президиуме АН СССР, в августе 1953 г. в Министерстве электростанций и электропромышленности и в ряде других организаций [11].

Отчет по НИР „Плоскость“ утвержден директором ФТИ АН СССР А.П. Комаром 25 сентября 1953 г.

Работы в ЦНИИ-108: накопленный коллективом С.Г. Калашникова научно-технологический опыт по созданию точечно-контактных триодов обеспечил оперативное проведение разработок плоскостных диодов и триодов. Разработка проводилась на монокристаллах германия, выращенных в основном непосредственно в ЦНИИ-108. В 1953 г. некоторое количество германия было получено из Гиредмета. Так же как и в ФТИ, $p-n$ -переходы на первых порах формировались выращиванием из расплава германия, позднее использовался более технологичный метод — сплавление индия в пластину германия n -типа проводимости. Коллектив ЦНИИ-108 успешно разработал методы создания плоскостных полупроводниковых диодов и триодов, методы контроля и исследования, провел подробные исследования созданных приборов.

Созданные в ФТИ АН СССР и ЦНИИ-108 плоскостные полупроводниковые диоды и транзисторы имели примерно одинаковые электрофизические параметры и соответствовали требованиям утвержденного технического задания на НИР „Плоскость“.

В эти же годы в ЦНИИ-108 впервые в СССР были изготовлены предложенные В. Шокли полевые транзисторы [7].

В НИИ-160 коллектив А.В. Красилова был занят разработкой промышленной технологии точечно-контактных транзисторов по ОКР „Точка“, заканчивавшейся одновременно с НИР „Плоскость“ в третьем квартале 1953 г. Одновременно много сил коллектива отнимала подготовка к перебазированию в 1953 г. во вновь организуемый НИИ-35 и организация в нем работ по завершению разработки и налаживанию производства точечно-контактных триодов. По этим причинам НИИ-160 практически не имел возможности принимать активное участие в работах по НИР „Плоскость“. В НИИ-35 эти разработки работы еще только начинались.

В ФИАНе также большое внимание уделялось продолжению работ по точечно-контактным транзисторам и исследованиям поверхностных явлений в германии (А.В. Ржанов). Также активно проводились совместные работы с Гиредметом по технологии и методам исследования германия. Поэтому работы по НИР „Плоскость“ проводились в ограниченном объеме. Однако макетные образцы плоскостных диодов и триодов были изготовлены и проведены их исследования.

НИР „Плоскость“ была предъявлена Государственной комиссией в установленные сроки. Госкомиссия приняла НИР на территории НИИ-35 в октябре 1953 г.

Комиссия приняла решение об успешном выполнении НИР „Плоскость“. Разработанные диоды и триоды имели параметры, соответствующие утвержденному техническому заданию. Наилучшие технологические решения и наиболее высокие параметры созданных диодов и триодов достигнуты в ЦНИИ-108 и в ФТИ АН СССР.

Комиссия приняла решение о проведении ОКР по разработке промышленной технологии плоскостных полупроводниковых диодов и триодов и последующую организацию их производства поручить НИИ-35, научно-технологические результаты, полученные исполнителями при выполнении НИР „Плоскость“, передать в НИИ-35 для использования их при выполнении ОКР.

В декабре 1955 г. на заводе „Светлана“ был организован первый в стране специализированный цех по серийному производству полупроводниковых триодов, разработанных в НИИ-35 [12]. ФТИ оказывал большую помощь в формировании коллектива и освоении технологии. В дальнейшем завод „Светлана“ сыграл большую роль в развитии отечественной полупроводниковой электроники.

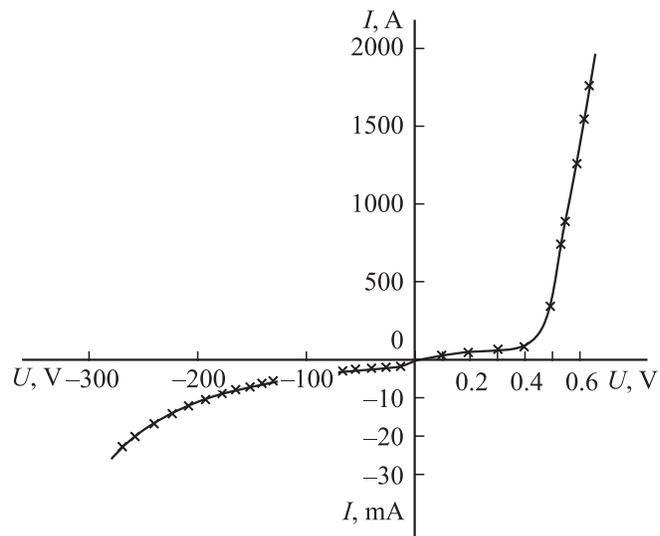
5. Сильноточные германиевые выпрямители

В ФТИ АН СССР по окончании НИР „Плоскость“ были продолжены работы по разработке плоскостных полупроводниковых приборов. Большое внимание было уделено повышению рабочих токов выпрямителей.

Всесоюзный электротехнический институт им. В.И. Ленина (ВЭИ) был подключен к разработкам силовых полупроводниковых выпрямителей. Физико-технический институт внедрил в ВЭИ разработанные в ФТИ технологические методы создания $p-n$ -переходов, методы исследований и испытаний германиевых выпрямителей.

В 1954 г. в ФТИ были созданы германиевые диоды с диаметром $p-n$ -переходов до 3 см. В конструкции с водяным охлаждением были созданы выпрямители с рабочими токами до 100–200 А. Позднее эти разработки также внедрялись в ВЭИ для организации промышленной технологии и изготовления.

В марте 1958 г. постановлением Правительства для первой атомной подводной лодки ФТИ была поручена разработка и поставка сверхсильноточного (на токи более 3 000 А) полупроводникового переключателя. Для такого переключателя были разработаны германиевые выпрямители с токами в каждом диоде до 1 000 А (Ж.И. Алфёров, В.И. Стафеев, В.М. Тучкевич). Вольт-амперная характеристика такого вентиля при комнатной температуре представлена на рисунке [13]. Первый переключатель был изготовлен, прошел необходимые испытания и поставлен заказчику в октябре 1958 г. ФТИ продолжал изготавливать и поставлять переключатели



Вольт-амперная характеристика германиевого вентиля с площадью $p-n$ -перехода 3 см^2 при комнатной температуре.

для последующих объектов вплоть до начала производства на серийном заводе. Разработанная технология и конструкции внедрены на заводе „Электровыпрямитель“ (г. Саранск), на котором при активном участии ФТИ было организовано их изготовление и поставка уже в 1959 г. Завод „Электровыпрямитель“ стал лидером производства полупроводниковых приборов силовой электротехники.

Разработанная технология и конструкция внедрены на заводе „Электровыпрямитель“ (г. Саранск), на котором при активном участии ФТИ было организовано их изготовление и поставка в 1959 г. Завод „Электровыпрямитель“ стал лидером производства полупроводниковых приборов силовой электротехники. Поскольку промышленное производство силовых полупроводниковых выпрямителей на серийном заводе было начато в 1959 г., можно считать, что 50 лет силовой полупроводниковой электротехники в СССР исполняется в 2009 г., хотя их первые макетные образцы были изготовлены в ФТИ раньше.

ФТИ внедрил в ВЭИ разработанные технологические методы создания $p-n$ -переходов, конструкции германиевых выпрямителей, методы исследования и испытаний. В дальнейшем ВЭИ внес большой вклад в развитие производства силовых германиевых выпрямителей и формирование всей силовой электротехники в нашей стране, как на заводе „Электровыпрямитель“, так и на других предприятиях [14].

В дальнейшем были разработаны и внедрены в серийное производство *кремниевые* сильноточные выпрямители (В.М. Тучкевич, И.В. Грехов, В.Е. Челноков, В.Б. Шуман).

Разработаны и внедрены в производство *тиристоры*. Разработка сильноточных тиристоров на основе кремния обеспечила создание в СССР нового важного научно-технического направления — сильноточные управля-

емые выпрямители (В.М. Тучкевич, В.Е. Челноков, В.Б. Шуман, И.В. Грехов и др.).

Работы коллектива В.М. Тучкевича отмечены присуждением Государственной и Ленинской премий СССР.

6. Другие работы ФТИ АН СССР по полупроводниковой электронике

В последующие годы в ФТИ АН СССР был проведен большой комплекс исследований и разработок, внесших значительный вклад в становление современной полупроводниковой электроники. Некоторые из наиболее важных приведены далее.

Б.Т. Коломиец совместно с коллективом НИИ-34 разработал и организовал производство фоторезисторов на основе PbS. Работа в 1951 г. отмечена присуждением Сталинской премии.

Н.А. Горюнова развернула работы по синтезу и исследованию новых полупроводниковых материалов. Эти исследования привели к предсказанию в 1950 г. [15] и к последующем синтезу нового класса полупроводников — *бинарных соединений* $A^{III}B^V$ — важнейшего класса полупроводниковых материалов современной электроники. В дальнейшем Н.А. Горюновой были предсказаны полупроводниковые свойства и затем синтезированы тройные и четверные полупроводниковые материалы. Однако до сих пор в мировой научной литературе принято считать, что этот класс полупроводниковых материалов предсказал и открыл Велькер, хотя его работа опубликована в 1952 г., т.е. на два года позже [16]. Приоритет Н.А. Горюновой в предсказании и открытии нового класса полупроводниковых материалов (InSb и другие) был, в конце концов, признан Международным судом во Франкфурте.

Н.А. Горюнова и Б.Т. Коломиец внесли большой вклад в открытие, разработку и исследование *стеклообразных* полупроводников.

В ФТИ АН СССР впервые в мире в 1955 г. созданы *плоскостные* полупроводниковые фотодиоды [17]. До этой работы были известны только малоэффективные фотодиоды с „боковым падением излучения“ [18].

Большой вклад в разработку и исследования *бесщелевых* полупроводников и твердых растворов *теллуридов кадмия и ртути* — основного материала современной ИК техники внесли сотрудники лаборатории Б.Т. Коломийца (В.И. Иванов-Омский, К.П. Смекалова и др.). Работа по бесщелевым полупроводникам отмечена присуждением Государственной премии СССР (В.И. Иванов-Омский, В.И. Стафеев и др.).

Разработаны основы теории диодов с „длинной“ базовой областью, предложены и разработаны новые полупроводниковые приборы — *инжекционные фотодиоды* с большим внутренним усилением фотосигналов, особенно в области примесного поглощения; *магнитодиоды* — сенсоры магнитного поля с высокой магниточувствительностью и др. (В.И. Стафеев) [19–22]. Работы отмечены Государственной премией СССР (В.И. Стафеев, И.М. Викулин, В.И. Муригин и др.).

Предсказано (В.И. Стафеев) [23] и открыто (В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев) [24] новое термоэлектрическое явление — перенос тепла инжектированными носителями [21]. На его основе создан новый класс термоэлектрических охладителей — *инжекционные термоохладители* с повышенной эффективностью, особенно в области низких температур [25].

Открыт эффект стимулированного излучения в полупроводниковых диодах на основе арсенида галлия (Д.А. Наследов, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков, А.А. Рогачев) [26]. Работа отмечена присуждением Ленинской премии. Эти исследования показали возможность реализации на основе арсенида галлия полупроводниковых лазеров.

Разработаны и внедрены в полупроводниковую электронику *гетеропереходы*, на основе которых созданы высокоэффективные полупроводниковые лазеры и светодиоды [27]. Основные разработчики отмечены присуждением Ленинской премии. Эти исследования обеспечили создание важнейшего научно-технического направления оптоэлектроники, получившего в последующие годы бурное развитие и обширное практическое применение в мире [28]. Комплекс работ по гетеропереходам и излучателям отмечен присуждением Ж.И. Алфёрову Нобелевской премии.

В начале 60-х годов в ФТИ начались исследования влияния сильного электрического поля на свойства полупроводников (Л.Е. Воробьев, В.И. Стафеев и др.). Позднее эти исследования привели к созданию модуляторов инфракрасного излучения на рабочие частоты свыше 1 ГГц [29], к открытию инфракрасного излучения под действием сильного электрического поля и в дальнейшем к созданию *безинжекционного полупроводникового лазера субмиллиметрового диапазона спектра* [30]. Работа коллектива авторов (А.А. Андронов, Л.Е. Воробьев и др.) отмечена Государственной Премией СССР.

Список литературы

- [1] В.М. Пролейко. Сб. *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009).
- [2] В.И. Стафеев. Сб.: *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009) вып. 1, гл. 7, с. 87.
- [3] О.В. Лосев. *У истоков полупроводниковой техники* (Л., Наука, 1972); О.В. Лосев. *Детектор-генератор, детектор-усилитель* (ТиГбп, № 14, 1922) с. 374; О.В. Лосев. „Кристалдин“. *Самодельный радиоприемник с кристаллическим детектором* (Пер. с англ.) 2-е изд. (Н.Новгород, Библиотека радиолюбителя, 1924) вып. 3; О.В. Лосев. *Свечение и электропроводность кавро-рунда и униполярная проводимость детекторов*. Вестн. электротехники, **8**, разд. 1, с. 247 (1931).
- [4] В.Е. Лашкарев, К.М. Косаногов. Изв. АН СССР. Сер. физ., **5**, 478 (1941).
- [5] Б.И. Давыдов. ЖЭТФ, **8**, 3 (1938); Б.И. Давыдов. ДАН, **20**, 279 (1938).

- [6] В.Д. Меркулов. Сб.: *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009) вып. 1, гл. 17, с. 211.
- [7] Н.А. Пенин. *Воспоминания „Как начиналась германиево-кремниевая электроника в нашей стране“*. „К истории ФИАН“, сер. „Портреты“. Вып. 4. „Н.А. Пенин“. Сост. В.М. Березанская (ФИАН, 2007).
- [8] С.Г. Мадоян. Сб.: *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009) вып. 1, гл. 2, с. 25.
- [9] „Пульсар“ „Прошлое... Настоящее... Будущее“. *Очерки об истории полупроводниковой электроники*, под ред. А.Г. Васильева (М., Техносфера, 2008).
- [10] W. Shockley. *Bell Syst. Techn. J.*, **28**, 435 (1949).
- [11] Материалы отчета ФТИ АН СССР (1953).
- [12] В.П. Цветов. Сб.: *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009) вып. 1, гл. 12, с. 140.
- [13] Ж.И. Алфёров, В.И. Стафеев, В.М. Тучкевич. *Изв. ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)*, вып. XLII, 267 (1960).
- [14] Ф.И. Ковалев. Сб.: *Очерки истории российской электроники*, под ред. В.М. Пролейко (М., Техносфера, 2009) вып. 1, гл. 17, с. 239.
- [15] Н.А. Горюнова. Автореф. канд. дис. (ЛГУ, 1950); Н.А. Горюнова. *ДАН СССР*, **75** (1), 51 (1950).
- [16] N. Welker. *Zs. Naturforsch.*, **7a**, 744 (1952).
- [17] Ж.И. Алфёров, Б.М. Коноваленко, С.М. Рывкин, В.М. Тучкевич, А.И. Уваров. *ЖТФ*, XXV (1), 11 (1955).
- [18] I.N. Shive. *JOSA*, **43**, 239 (1953).
- [19] В.И. Стафеев. *ЖТФ*, XXVIII (8), 1631 (1958); В.И. Стафеев. *ФТТ*, **1** (6), 841 (1959); V.I. Stafeev, V.M. Tuchkevich. *Reports on Nineteenth Annual Conf. Phys. Electron., MJT* (Cambridge, Massac, 1959).
- [20] В.И. Стафеев. *ФТТ*, **3**, в. 9, с. 2513 (1961). И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев. *Фотоприемники с инжекционным усилением* (М., ЦНИИ Электроника, 1989).
- [21] Э.И. Каракушан. *Магнитодиоды — полупроводниковые приборы с высокой магниточувствительностью* (Л., ЛДНТП, 1964); В.И. Стафеев, Э.И. Каракушан. *Магнитодиоды* (М., Наука, 1975).
- [22] Ю.Г. Золотарев, В.И. Стафеев. *Электронная техника*, сер. 6 *Микроэлектроника* № 1 (16), 17 (1969); В.И. Стафеев, К.Ф. Комаровских, Г.И. Фурсин. *Нейристорные и другие функциональные схемы с объемной связью* (М., Радио и связь, 1981).
- [23] В.И. Стафеев. *ФТТ*, II (3), 438 (1960) [Пер.: V.I. Stafeev. *Sov. Phys. Solid State*, **2**, 406 (1960)].
- [24] В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев. *Тр. МФТИ*, сер. *Радиотехника и электроника*, № 7, 57 (1974).
- [25] В.И. Стафеев. **43** (10), 1321 (2009).
- [26] Д.Н. Наследов, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков, А.А. Рогачев. *ФТТ*, **4** (11), 3346 (1962).
- [27] Ж.И. Алфёров, Р.Ф. Казаринов. А. с. 181737. [Бюл. изобретат., № 14 (1975) с. 147] — приоритет от 30 марта 1973 г.
- [28] Ж.И. Алфёров. *Физика и жизнь* (СПб., Наука, 2000).
- [29] М.А. Васильева, Л.Е. Воробьев, У.Б. Солтамов, В.И. Стафеев, А.Ю. Ушаков, А.В. Штурбин. *ФТП*, **1** (3), 439 (1967).
- [30] Л.Е. Воробьев, В.С. Комиссаров, В.И. Стафеев. *Письма ЖЭТФ*, **13**, 140 (1971); L.E. Vorobjov, D.V. Donetsky, Yu.V. Kochegarov, V.I. Stafeev, D.A. Firsov. *Abstracts 8th Int. Conf. on Hot carriers in Semicond.* (Oxford, England, 1993) p. 46.

Редактор Т.А. Полянская

The initial stages of formation of semiconductor electronics in the USSR (to 60-anniversary of transistor opening)

Review

V.I. Stafeev

State Scientific Center «RD&P Center „Orion“»,
111123 Moscow, Russia

Abstract The most important early researches and developments of the Russian scientists on the physics and the technician of semiconductors and semiconductor devices, including a little known till the present time, played the important role in formation of semiconductor electronics in the USSR have been presented.