

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ПЕНИН



ФИАН 2007

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

К истории ФИАН
Серия «Портреты»
Выпуск 4

Николай Алексеевич
ПЕНИН

Москва 2007

К истории ФИАН. Серия «Портреты». Выпуск 4.
Николай Алексеевич Пенин

Автор-составитель – В.М. Березанская

Сборник посвящен 95-летию старейшего сотрудника ФИАН Николая Алексеевича Пенина, выдающегося специалиста в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов, талантливого педагога, хорошего человека.

Сборник содержит воспоминания Н.А. Пенина о его научной деятельности, его беседу с сотрудниками ФИАН, автобиографические данные, краткую научную биографию, список трудов, фотографии из личного архива Николая Алексеевича.



Николай Алексеевич Пенин

Содержание

Предисловие	5
Краткая научная биография	6
<i>В.А. Курбатов</i> . Н.А. Пенин глазами сотрудника	8
Воспоминания Н.А. Пенина	9
Как начиналась германиево-кремниевая электроника в нашей стране	9
Что я делал в электронике	12
Командировка в Германию	28
Беседа Ф.А. Пудонина и В.М. Березанской с Н.А. Пениным	32
Основные даты жизни Н.А. Пенина	40
Список научных статей	42

Предисловие

26 апреля 2007 года исполнилось 95 лет старейшему сотруднику ФИАН Николаю Алексеевичу Пенину, выдающемуся специалисту в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов, талантливому педагогу, хорошему человеку. Николай Алексеевич широко известен в нашей стране благодаря пионерским работам по полупроводниковой электронике. Научная деятельность Н.А. Пенина высоко оценивается крупными физиками. Директор Отделения физики твердого тела ФИАН Ю.В. Копаев назвал его «нашим советским Шокли».

Много лет знает Николая Алексеевича Нобелевский лауреат Жорес Иванович Алферов. В поздравительном послании по поводу его 90-летия Ж.И. Алферов пишет, что Н.А. Пениным «получены результаты первостепенного научного и практического значения: создание впервые в мире параметрических диодов и впервые в СССР – туннельных диодов; развитие методологических основ очистки и выращивания германия; разработка СВЧ детекторов со сварным контактом для радиолокации (Государственная премия СССР 1951 года); исследование частотных свойств полупроводниковых диодов; исследование примесных полупроводников методом электронного парамагнитного резонанса, а также исследования высокочастотной фотопроводимости примесных полупроводников, в результате которых впервые в СССР были созданы высокочастотные гетеродинные фотоприемники 10-микронного излучения на основе примесного германия для лазерной локации. Все эти работы легли в основу промышленного развития полупроводниковой электроники в СССР».

Н.А. Пенин – профессор, ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки РСФСР», он много лет являлся членом секции по радиоэлектронике Комитета по Ленинским и Государственным премиям и членом экспертной группы по физике в Высшей аттестационной комиссии. Он один из создателей кафедры физики полупроводников физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, автор курса физики полупроводников, читавшегося им в МГУ и Московском энергетическом институте. Под его руководством выполнены и защищены 11 кандидатских диссертаций и 3 докторских.

Разносторонняя деятельность Николая Алексеевича отмечена многими государственными наградами, среди которых Государственная (Сталинская) премия (1951), орден «Знак почета» (1971), орден «Почета» (2002).

Предлагаемый сборник посвящен 95-летию Н.А. Пенина и содержит его воспоминания о научной деятельности, беседу с сотрудниками ФИАН, биографические данные, список трудов, фотографии из личного архива Николая Алексеевича и его сотрудников.

В.М. Березанская

КРАТКАЯ НАУЧНАЯ БИОГРАФИЯ

Пенин Николай Алексеевич (р. 26.04.1912 г.) – физик, доктор физико-математических наук (1968 г.), профессор (1978 г.). Родился в с. Кушелово Лотошинского района Московской области. В 1931 г. окончил Московский техникум электропромышленности им. Л.Б. Красина. С февраля 1930 по сентябрь 1934 г. работал техником на Московском электроламповом заводе (МЭЛЗ). В сентябре 1934 г. поступил на Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), который окончил в июне 1939 г. С сентября 1940 по декабрь 1945 г. – научный сотрудник Научно-исследовательского кино-фото института (НИКФИ). С декабря 1945 по декабрь 1956 г. – научный сотрудник Центрального научно-исследовательского радиотехнического института (ЦНИРТИ), тогда ЦНИИ-108 Министерства обороны. С января 1956 г. по октябрь 1959 г. – старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ). С октября 1959 г. работает в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) (с 1986 г. – ведущий научный сотрудник, с 1992 г. – научный советник РАН). Одновременно в 1948 – 1960 гг. – ассистент и доцент кафедры общей физики и кафедры физики полупроводников Физического факультета МГУ, в 1960 – 1975 гг. – доцент кафедры полупроводниковых приборов Московского энергетического института (МЭИ).

Работы Н.А. Пенина посвящены физике газового разряда и фотоэффектов, физике твердого тела, физике полупроводников и полупроводниковых приборов.

В 1930 – 1934 гг. участвовал в разработке и изготовлении сигнальных неоновых рекламных трубок, конструировал и изготовлял серно-калиевые газонаполненные, а затем вакуумные кислородно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые фотоэлементы для звукового кино. Участвовал в разработке и изготовлении фотоэлектронных умножителей для звукового кино. Занимался изготовлением неоновых ламп с плоским равномерно светящимся экраном для телевидения.

По предложению академика А.Ф. Иоффе разрабатывал селеновые выпрямители для применения в кино и в оборонной технике (1945 г.).

Разработал методику очистки и легирования селена и более совершенную технологию изготовления селеновых выпрямителей, основанную на осаждении паров серы на поверхность селенового слоя.

Первым в нашей стране получил очищенный и затем монокристаллический германий (1948 г.). В итоге были созданы и испытаны на радиолокационных станциях германиевые смесительные детекторы с устойчивыми характеристиками. В 1951 г. за эти работы Н.А. Пенину присуждена Сталинская премия.

Предложил оптимальную технологию изготовления вплавных диодов и транзисторов.

Выполнил ряд исследований диодов с р-п переходами. В одной из работ показал роль поверхностной рекомбинации на границе невыпрямляющего электрода на характеристики диодов с р-п переходами. На основе исследований емкостных характеристик вплавных диодов были созданы первые параметрические диоды.

Создал экспериментальную установку для изучения взаимодействия примесей с мелкими энергетическими уровнями в кремнии методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Разработал и создал примесный фотоприемник на основе германия, легированного цинком и сурьмой, для целей лазерной ИК локации (совместно с В.А. Курбатовым и Т.М. Бурбаевым). При этом был разработан и реализован метод определения гетеродинных характеристик фотоприемников без применения смещения частот двух независимых лазеров. В результате было показано, что на основе фототермической ионизации могут быть созданы селективные фотоприемники, фоточувствительность которых определяется дополнительной оптической подсветкой (стимуляция).

Дал теоретическое объяснение эффекта отрицательной емкости в однородной полупроводниковой структуре.

Исследовал возникновение магнитного поля в неравномерно вращающемся сверхпроводящем кольце.

Теоретически рассмотрел емкостные и фотоемкостные свойства МДП-конденсатора при низких температурах.

Опубликовал более сотни научных статей.

В 1951 г. присуждена Государственная (Сталинская) премия.

Удостоен звания «Заслуженный деятель науки РСФСР» (1991 г.).

Награжден орденами «Трудового Красного Знамени», «Почета», «Знак почета», медалью «За трудовую доблесть» и др.

В.М. Березанская

В.А. Курбатов

Н.А. ПЕНИН ГЛАЗАМИ СОТРУДНИКА

(Шутливое жизнеописание)

Не правы китайцы со своим утверждением о живущих в эпоху перемен. Вы — опровержение им и Конфуцию.

Ваш научный и жизненный опыт:

- от самолета «Илья Муромец» — до туристов в космосе,
- от трубки Зворыкина и диска Нипкова — до мобильных телефонов и компьютеров,
- от 300-летия Дома Романовых — до дикого капитализма с лицом социализма, — говорит, что настоящий Ученый не подвержен ветрам времени. Ваша научная деятельность началась в 30-е годы, девиз которых: «*все выше и выше, и выше*». Живой ум молодого ученого услышал так: «*все выше частоты несущих, все выше частоты сигналов*». Уже первый объект Ваших исследований — фотоэлемент, причем не вакуумный, а газонаполненный (главное — содержание!), конечно, принимал оптические несущие, и Вы повышали частоты сигналов.

Потом Война! Подлая, она показала, как хрупки стеклянные колбы, и с тех пор — только твердое тело!

Вы были пионером **твердых детекторов** — от селеновых выпрямителей к германиевым диодам — сплавным, диффузионным, сварным, — «*частоты все выше и выше*», — и в результате, — «*радары у наших границ!*» — СВЧ-несущая и видеосигнал.

Потом «Звездные войны», а для них нужны лидары: оптические несущие и СВЧ-сигналы. И здесь Вы — первый!

А в перерывах международных обострений Вы занимаетесь чистой наукой: ЭПР, излучательная рекомбинация, ЭДК (снова СВЧ и оптика).

И еще заметна Ваша любовь к тесным, или, как Вы их называете, «интимным» контактам твердых тел. Время от времени Вы выпускаете «интимные», без соавторов, работы о разного рода контактах: металл-полупроводник (1966), металл-диэлектрик-полупроводник (2000), об отрицательной емкости контактов, — «*выше частоты!*» (1996), — о длине экранирования, как основе контактов (1983).

Не обошли Вы вниманием и сверхпроводимость — эту всем и много обещающую даму твердого тела, затеяв с нею разговор об инерции электронов и тепловых флуктуациях и заставив ее затем переключать свои любимые СВЧ-сигналы.

Вы — талантливый педагог. Об этом говорят не только Ваши первые в России лекции по полупроводникам, но и ваши аспиранты и соискатели. По общим меркам у Вас их немного — дюжина, но мало у кого треть из них становится докторами.

Воспоминания Н.А. Пенина

КАК НАЧИНАЛАСЬ ГЕРМАНИЕВО-КРЕМНИЕВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В НАШЕЙ СТРАНЕ

1946 год. В ЦНИИ-108 разворачивались работы по радиолокации. Были необходимы СВЧ детекторы. Изготавливаемые в НИИ-160 во Фрязино под руководством А.В. Красилова кремниевые детекторы с прижимным контактом были ненадежны. Они выгорали при попадании в приемную антенну мощного СВЧ излучения от других станций. Детекторы представляли собой прижимной контакт вольфрамовой петли с пленкой кремния, напыленной на графитовую подложку. Свойства пленки кремния не определялись. Характеристика детектора несколько оптимизировалась небольшим перемещением петли. Работы по СВЧ детекторам в институте только начинались.

В 1946 г. я поступил в 5-ю лабораторию, которой руководил проф. С.Г. Калашников. Ему были нужны люди, знакомые с полупроводниками. Я уже имел некоторый опыт по исследованию полупроводников – селеновых выпрямителей, диодов. Мне была поручена работа по исследованию и разработке устойчивых к перегрузкам СВЧ детекторов для 3-х сантиметрового диапазона волн.

Работа над СВЧ детекторами получила мощную поддержку вице-адмирала академика А.И. Берга. Я помню как в марте 1946-го в нашу комнату, где я работал, вошел Аксель Иванович с мартовским номером «Journal of Applied Physics» в руках и сказал: «Вот американцы сделали устойчивые к выгоранию германиевые детекторы со сварным контактом. Нам надо срочно приступить к таким исследованиям. Изучите, что тут написано, и доложите свои соображения».

Из статьи стало ясно, что требуется кристаллический германий, обладающий удельным сопротивлением около 0.006 Ом-см, легированный сурьмой.

Однако в нашей стране германия не было. Его никто не использовал и, естественно, не добывал. Это был рассеянный элемент. Ничтожное количество его содержалось в каменном угле и в отходах от сжигания угля. Тогда Аксель Иванович, пользуясь своими каналами, поручил приобрести некоторое количество германия за рубежом. Месяца через два мы получили слиток германия весом, примерно, 100 грамм.

И это было только начало. Оказалось, что германий был сильно загрязнен и обладал очень малым удельным сопротивлением. Выпрямительный эффект контакта металлического острия с пластинкой из этого германия отсутствовал – наблюдалась линейная вольтамперная характеристика. Химический анализ показал, что он загрязнен железом. Надо было имеющийся германий химически очистить и легировать необходимой примесью. Известный институт ГИРЕДМЕТ этим не занимался.

Никто не знал, как надо очищать загрязненный металлический германий. В этом случае помог опыт, полученный мною в работе с инженер-полковником К.В. Астаховым из ВАХЗ (Всесоюзная академия химической защиты им. К.Е. Ворошилова) при очистке селена для селеновых выпрямителей.

Я поступил также как при очистке и легировании селена. Для уменьшения возможности потерять уникальный для нас материал, мы разделили эти 100 грамм на три части и проводили технологические опыты сначала с одной частью. Очистка состояла в сжигании навески германия в атмосфере хлора, дисципляции получившейся жидко-

сти четырех-хлористого германия, превращения её в двуокись германия и восстановления до чистого германия в атмосфере водорода. В результате был получен очищенный германиевый порошок.

Далее надо было получить монокристаллический германий. После ряда попыток выращивания кристаллов по Бриджмену была сконструирована и изготовлена установка для получения монокристаллов методом Чохральского. Первые монокристаллы по Чохральскому были выращены в середине 1948 года.

Удельное сопротивление исходного германия составляло примерно 0.002 Ом·см. Первые монокристаллы из очищенного нами германия имели удельное сопротивление около 7 Ом·см. Это соответствовало уменьшению концентрации примесей примерно в 3-4 тысячи раз. Для детекторов трехсантиметрового диапазона удельное сопротивление германия должно быть около 0.006 Ом·см. Стало необходимым научиться легировать германий примесью с малой энергией ионизации для уменьшения его удельного сопротивления до необходимой величины. Для этого была использована сурьма.



Н.А. Пенин, В.Г. Алексеева, С.Г. Калашиков (1948-1950 гг.).

Много труда положила В.Г. Алексеева на разработку метода введения сурьмы в относительно малых количествах. Сначала приготавливали лигатуру – сплав германия с радиоактивной сурьмой. Затем по радиоактивному излучению оценивалось содержание сурьмы в лигатуре. Далее подбиралась необходимая навеска лигатуры для требуемого легирования германия и выращивался легированный монокристалл германия.

Для создания СВЧ диода острое заточенной проволоки из сплава платины с рутением прижималось к кристаллу германия и приваривалось импульсом тока через контакт. Диаметр контакта составлял примерно 5 микрон. Измерения смесительных свойств детекторов производились модуляционным методом в волноводном смесителе 3-х сантиметрового диапазона, а также непосредственным смешением излучений двух клистронов с выделением промежуточной частоты на 30 ГГц.

В итоге были созданы и испытаны на радиолокационных станциях германиевые смесительные детекторы с устойчивыми характеристиками. Детекторы работали в смесительном режиме при мощности СВЧ гетеродина в 1 мВатт и при необходимом токе положительного смещения. Работа производилась под шифром «Контакт».

В конце декабря 1950 года А.И. Берг доложил И.В. Сталину, что работа «Контакт» успешно завершена. Это было около 11 часов вечера 31 декабря. В 1951 году за эту работу была присуждена Сталинская премия С.Г. Калашникову (руководитель работы), В.Г. Алексеевой, Г.С. Кубецкому и Н.А. Пенину (зам. руководителя).

В дальнейшем работа по добыче, очистке, выращиванию монокристаллов германия, а также легированию необходимыми примесями была поручена, по инициативе А.И. Берга, Государственному институту редких металлов (ГИРЕДМЕТ), руководителю Н.П. Сажиним.

В это же время в журналах появилось сообщение о создании точечного транзистора на германии. Наш сотрудник Г.С. Кубецкий выполнил ряд успешных предварительных исследований по точечным транзисторам. Работа по точечным транзисторам продолжалась в отраслевом институте (НИИ-35) Министерства электропромышленности.

А.И. Берг был очень заинтересован в развитии транзисторов. Для усиления работ он привлек адъюнкта Военной академии им. Фрунзе Я.А. Федотова, который создал первый радиоприемник на точечных транзисторах. Для исследования свойств легированного германия А.И. Берг пригласил еще одного сотрудника из академии наук Ю.В. Шмарцева. Спустя некоторое время Юрий Васильевич переехал в Ленинград в Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе и там продолжал работу по германию.

В 1952 в году в журнале IRE появилось сообщение о создании на основе германия транзисторов с вплавными контактами.

После окончания работ по теме «Контакт» нашему институту вместе с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева, Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе и Фрязинским институтом НИИ-160 была поручена работа по созданию (плоскостных – в отличие от точечных) вплавных германиевых транзисторов под шифром «Плоскость». Опять же этому способствовал А.И. Берг. Однако Фрязинский институт НИИ-160 в это время переезжал в Москву и в разработке первых плоскостных транзисторов участия не принимал.

Режим вплавления индия в германий был неизвестен. Технология изготовления вплавных диодов и транзисторов, разработанная в нашей лаборатории, оказалась наиболее оптимальной, а транзисторы имели более заверченный вид и обладали наиболее высокими частотными свойствами. Тогда же в нашей лаборатории мною были созданы первые полевые транзисторы типа Шокли.

А.И. Берг способствовал передаче нашего опыта работы с германием другим организациям. Для освоения методики очистки германия были приглашены сотрудники ГИРЕДМЕТА в химическую лабораторию нашего института. Для ознакомления с технологией выращивания монокристаллов германия приглашался сотрудник ФИАНа В.С. Вавилов.

Работа с германием дала большой импульс в понимании и развитии современной физики полупроводников. На основе опыта работы с германием и приборами из германия (диоды, транзисторы, фотоприемники) было значительно легче освоить электронику на основе кремния.

Можно уверенно сказать, что исследования по созданию германиевых приборов (диоды, транзисторы), начатые по инициативе А.И. Берга в лаборатории №5 ЦНИИ-108, послужили основным стимулом интенсивного развития электроники в нашей стране.

Что я делал в электронике

Электроника меня заинтересовала, когда я еще был учеником 7-летней школы при Волоколамском детском городке им. III-го интернационала, которая помещалась в бывшем Иосиф Волоколамском монастыре. Там была приобретена первая радиоприемная станция. В клубе, где была установлена радиостанция, собирались люди слушать последние известия. Мы, небольшая группа учеников, дежурили возле установки и обслуживали её. Радиоприемник работал от аккумуляторов. Познакомившись с радио, мы стали строить самодельные радиоприемники с точечными кристаллическими детекторами. Тогда в журнале «Радиолюбитель» был описан простой радиоприемник Шапошникова на точечных детекторах. В то время еще не было переменных конденсаторов, и настройка на передающую станцию производилась с помощью вариометров. Это две короткие катушки самоиндукции, одна из которых поворачивалась внутри другой, что вызывало изменение общей индуктивности и соответствующее изменение частоты контура (настройка). Конденсаторы изготавливали из листочков слюды и металлических фантиков от конфет

В деревне Кушелово (тогда Волоколамского уезда Московской губернии), где мы жили, я поставил высокую антенну, и мне удавалось принимать и слушать не только Московскую радиостанцию имени Коминтерна, но и некоторые зарубежные станции.

В то же время, в журнале «Радиолюбитель» появилась статья О.В. Лосева из Нижегородской лаборатории о «кристадине» – радиоприемнике с усиливающим кристаллом. Всё это вызывало у меня большой интерес. С помощью кристадина я пытался осуществить «громкоговорящий» радиоприем.

В 1931 г. я окончил Московский техникум электропромышленности им. Л.Б. Красина при Московском электроламповом заводе (МЭЛЗ). Мне была присуждена квалификация техника по электроламповому производству. С февраля 1930 по сентябрь 1934 г. я работал техником на Московском электроламповом заводе. Некоторое время я работал в цехе по производству ламп накаливания и обслуживал систему вакуумных механических насосов. Затем меня перевели в отдел производственных исследований (ОПИ), в лабораторию неоновых ламп и фотоэлементов. Лабораторией руководил тогда венгр Имрек Дежович Натонек – талантливый инженер.

Я непосредственно участвовал в разработке и изготовлении сигнальных неоновых ламп, работающих в режиме тлеющего разряда, затем в создании неоновых трубок для аэродромных маяков и в рекламных целях. В 1932 г. в честь 15-летия Советской власти впервые в Москве на башнях МЭЛЗа нами была смонтирована цифра XV из неоновых трубок.

Затем я конструировал и изготовлял серно-калиевые газонаполненные фотоэлементы для звукового кино. Тогда кино было еще немое. Фотоэлемент представлял собой стеклянную колбу (типа колбы ламп накаливания), на половине внутренней поверхности которой создавался фоточувствительный слой. Для этого на половину внутренней поверхности колбы наносился химическим путем тонкий слой серебра. Слой серебра соприкасался с металлическим электродом, впаянным в стенку колбы. Затем на поверхность слоя серебра в вакууме осаждался тонкий слой металлического калия, который еще не обладает достаточной фоточувствительностью. Для увеличения фоточувствительности слой калия подвергался сенсibiliзации путем напыления

тонкого слоя серы. Процесс напыления производился под контролем, т. е. при наблюдении за изменением силы фототока при постоянном освещении фотокатода. Процесс прекращался при достижении максимума фототока; дальнейшее напыление приводило к уменьшению фоточувствительности. Вторым электродом (анодом) служило никелевое кольцо. После сенсбилизации колба наполнялась газом неоном до нескольких миллиметров ртутного столба для дальнейшего увеличения фоточувствительности лавинным размножением фототока. Наполнение газом также производилось при контроле фототока при заданном напряжении на фотоэлементе. Подбиралось давление неона, соответствующее максимуму фототока.

Первый звуковой кинофильм «Путевка в жизнь» демонстрировался на изготовленных мною серно-калиевых фотоэлементах.

Газонаполненные фотоэлементы работали в режиме ударного усиления фототока при напряжении несколько ниже электрического пробоя. Это вызывало нестабильность свойств газонаполненных фотоэлементов. Их фоточувствительность уменьшалась из-за бомбардировки фотокатода ионами неона, что вызывало нарушение сенсбилизированного слоя калия. Потом я участвовал в разработке и изготовлении вакуумных кислородно-цезиевых и сурьмяно-цезиевых фотоэлементов.

Когда начались исследования по созданию телевидения, мы проводили эксперименты с плоской неоновой лампой, светящейся в режиме тлеющего разряда.

На неоновую лампу подавалось необходимое постоянное напряжение смещения и переменное напряжение от радиоприемника, принимающего телевизионный сигнал. Прием изображения состоял в просмотривании промодулированной по яркости тлеющего свечения плоской неоновой лампы через вращающийся диск (диск Нипкова) с квадратными отверстиями, расположенными со сдвигом на величину отверстия по радиусу и углу (по диагонали). Синхронизируя скорость вращения диска с частотой модуляции яркости свечения неоновой лампы, вызываемой принимаемым телевизионным сигналом, удавалось наблюдать устойчивую картину походов типа «Микки Маус», передаваемую немецкой радиостанцией из тогдашнего Кёнигсберга.

Я сконструировал и изготовил неоновые лампы с плоским равномерно светящимся экраном размером 4 на 6 см. Экран неоновой лампы изготовлялся из пластины чистого железа, а для достижения равномерного тлеющего свечения пластина подвергалась бомбардировке ионами чистого водорода в режиме тлеющего разряда. Это было необходимо для удаления естественной пленки окисла железа. Подбирая давление неона в лампе и ток тлеющего разряда, можно было добиться необходимой яркости и четкой контрастности изображения.

Смотреть экспериментальные телепередачи мы ездили в радиоцентр, который помещался тогда на Никольской улице, близ Красной площади, и привозили с собой изготовленные нами неоновые лампы с плоским электродом. Эти эксперименты скоро закончились, так как были разработаны и изготовлены электронно-лучевые трубки с разверткой электронного луча по экрану.

С сентября 1934 по июнь 1939 г. я был студентом Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). В университет я поступил сразу на второй курс, сдав экзамены за первый. Физику сдавал профессору С.Э. Хайкину. Я поступил на кафедру «Электрических явлений в вакууме и разряженных газах», руководимую проф. Н.А. Капцовым.

Моя дипломная работа была посвящена исследованию инерции газонаполненных серно-калиевых фотоэлементов. Я измерял зависимость величины фототока от частоты прерывания светового потока, падающего на фотоэлемент. Фотоэлементы работали в режиме газоразрядного (ударного) усиления фототока. Было обнаружено вли-

яние малых добавок аргона к неону на инерцию фотоэлементов. Добавки аргона уменьшали время жизни метастабильных атомов неона, ограничивающих быстродействие фотоэлементов. Поэтому введение небольшого количества аргона в неон позволило улучшить частотные свойства фотоэлементов и, соответственно, улучшить качество воспроизведения звука в кино. Моя дипломная работа была опубликована в журнале Технической физики в 1939 году. Однако газонаполненные сернокалиевые фотоэлементы были вскоре заменены вакуумными кислородно-цезиевыми и сурьмяно-цезиевыми фотоэлементами, т. к. они более устойчивы и менее инерционны.

С сентября 1940 по декабрь 1945 г. я работал научным сотрудником Научно-исследовательского кино-фото института (НИКФИ). В это же время продолжал сотрудничать с П.В. Тимофеевым по совершенствованию вакуумных кислородно-цезиевых фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей для звукового кино. Испытания фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей мы производили в кинотеатре «Ударник». Это была наша испытательная станция.

Петр Васильевич консультировал работы по разработке и изготовлению фотоэлементов на Московском электроламповом заводе и сотрудничал с НИКФИ.

По предложению академика А.Ф. Иоффе я участвовал в разработке селеновых выпрямителей для кино и оборонной техники. В то время изготавливались медно-закисные выпрямители. Однако они были плохо воспроизводимы. Технология изготовления селеновых выпрямителей еще не была достаточно разработана. В мае-октябре 1945 г. вместе с сотрудником В.Г. Комаром с целью ознакомления с технологией изготовления селеновых выпрямителей я был командирован в Германию. Нам выдали военное обмундирование и присвоили звания капитанов. В середине мая 1945 года мы вылетели в Берлин. В Германии нам надлежало посетить ряд заводов, на которых производились селеновые выпрямители, и ознакомиться с технологией их изготовления. В Берлине мы посетили завод фирмы АЕГ (AEG), а затем завод той же фирмы в местечке Гроссрешен вблизи Дрездена, но и здесь, как и в Берлине, производство селеновых выпрямителей было остановлено. Тогда селеновые выпрямители производились только на заводе в городе Котбус. Так как на заводе в г. Котбус главные специалисты отсутствовали (на заводе нам сказали, что накануне их увезли американские военные), по распоряжению военного коменданта операторы изготовили для нас несколько небольших партий селеновых выпрямителей (по нашим указаниям и под нашим наблюдением). Изменяя режимы изготовления выпрямителей, мы выяснили особенности немецкой технологии.

Затем, будучи сотрудником НИКФИ, я был командирован в военную академию ВАХЗ им. К.Е. Ворошилова в лабораторию неорганической химии, руководимую инженер-полковником К.В. Астаховым, для исследований с целью дальнейшего улучшения характеристик селеновых выпрямителей и технологии их изготовления. Первоначальная и основная задача состояла в получении селена с необходимыми качествами (в смысле чистоты и наличия необходимых или ненужных примесей). В результате выполненных исследований была разработана методика очистки и легирования селена необходимыми примесями, найдена новая технология изготовления селеновых выпрямителей, основанная на осаждении серы на поверхность кристаллического селенового слоя с целью улучшения запирающего слоя в контакте селена с металлом. Обработка (выдержка в паре серы при температуре около 200 градусов Цельсия) открытого слоя закристаллизованного слоя селена на металлической подложке (диске) вызывала резкое уменьшение обратного тока и повышение обратного (запирающего) напряжения селеновых диодов.

В результате исследований вольтамперных характеристик селеновых выпрямителей была установлена связь высоты потенциального барьера Шоттки с рабо-

той выхода контактирующего с селеном металла. Далее было исследовано влияние легирования селена металлами и галогенами на выпрямительные характеристики выпрямителей (диодов). Кроме этого, по предложению К.В. Астахова были выполнены измерения поверхностного натяжения жидкого селена и его зависимости от температуры.

Работа и общение с К.В. Астаховым сопровождалась очень интересными и плодотворными обсуждениями, что способствовало успешному ходу исследований. Мне хочется привести отзыв о моей работе с ним.

«ОТЗЫВ

Николай Алексеевич ПЕНИН, научный сотрудник Научно-исследовательского кино-фото института /НИКФИ/, в последние 2 года непрерывно работал со мной в моей лаборатории над изучением влияния чистоты селена и поверхностной химической его обработки на диске на электрические свойства селеновых выпрямителей. В этой работе Н.А. Пенин проявил незаурядные способности прекрасного экспериментатора, широко эрудированного по вопросам, касающимся его исследовательской темы, глубоко образованного вообще по экспериментальной физике и весьма хорошо разбирающегося в вопросах электронной теории. Навыки опытного экспериментатора Н.А. Пенин приобрел в бытность его сотрудником лаборатории фотоэлементов Московского электролампового завода и затем, по окончании им физического факультета МГУ в 1939 г., в качестве сотрудника профессора Капцова и Спивака. За последние 5-6 лет Н.А. Пенин вырос в серьезного научного работника, способного не только самостоятельно ставить и решать научные вопросы, но и руководить небольшим коллективом сотрудников.

Необходимо отметить исключительные способности Н.А. Пенина как экспериментатора. Прекрасно освоив технику работы с высоким вакуумом, Н.А. Пенин овладел в нужной мере техникой стеклодува, механика, электротехника, умелого конструктора, способного собственными руками осуществить задуманную конструкцию прибора.

Таким образом, Н.А. Пенин являет собой пример сочетания прекрасно образованного физика-теоретика и опытного талантливый экспериментатора. Всё сказанное дает мне основание считать, что при благоприятных условиях из Н.А. Пенина может вырасти превосходный ученый, который безусловно оставит глубокий след в советской физике.

Начальник кафедры неорганической химии
ВАХЗ Красной армии
*Инженер-полковник /К. АСТАХОВ/
17 мая 1945 года.»*

С декабря 1945 по декабрь 1956 г. я работал научным сотрудником Центрального научно-исследовательского радиотехнического института (ЦНИРТИ), тогда ЦНИИ-108 Министерства обороны. Я поступил в ЦНИИ-108 по рекомендации проф. С.Г. Калашникова. От него я узнал, что в ЦНИИ-108, где он был руководителем одной из лабораторий, начинаются работы по созданию СВЧ детекторов для радиолокации. Ему были нужны люди, знакомые с полупроводниковыми выпрямителями или детекторами. Я уже имел некоторый опыт работы с селеновыми выпрямителями и мне было интересно заняться СВЧ детекторами. Сам С.Г. Калашников в это время был занят исследованиями электронной эмиссии с целью создания мощных катодов электронной эмиссии из различных материалов для создания мощных СВЧ электронных ламп для радиолокации.

По результатам исследований, выполненных в НИКФИ, и, в основном, в ВАХЗ, в 1949 г. в ЦНИИ-108 я защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование селеновых выпрямителей». Оппоненты: профессора Г.В. Спивак и П.В. Тимофеев рекомендовали присудить ученую степень доктора по техническим наукам. Однако председатель ученого совета вице-адмирал академик А.И. Берг сказал: «Пусть лучше защищает кандидатскую».

В то время кремниевые детекторы с прижимным контактом, изготавливаемые эвакуированными немецкими сотрудниками в НИИ-160 во Фрязино (вблизи Москвы), были ненадежны, они часто выгорали при попадании в антенну радиолокационной станции мощного СВЧ излучения других станций.

Было ясно, что прижимной контакт острия проволоки к полупроводнику неустойчив. Изменение температуры, механические воздействия (уронили на пол) изменяли или даже нарушали выпрямительные (детектирующие) свойства.

Стало необходимым создать СВЧ детекторы с надежным и устойчивым контактом. Для этого был использован легированный примесью германий.

Наряду с созданием СВЧ детекторов со сварным контактом (не прижимным), я исследовал электрические свойства этих детекторов на СВЧ частотах и на постоянном токе.

Основной характеристикой качества смесительных диодов являются потери при преобразовании частот. У хороших детекторов эти потери частот составляли примерно 7 децибелл. Иногда получались диоды с потерями преобразования частот всего в 6 децибелл.

Измерения смесительных свойств детекторов производились модуляционным методом в волноводном смесителе 3-х сантиметрового диапазона и непосредственным смешением излучения двух клистронов с выделением промежуточной частоты 30 МГц. В модуляционном методе модуляция СВЧ излучения производилась вращающимся эллиптическим диском, вырезанным из тонкой графитовой пластинки, выступающий край которого периодически погружался в тонкую щель, прорезанную на широкой стороне волновода. Частота вращения диска составляла несколько килогерц.

В итоге были созданы и испытаны на действующих радиолокационных станциях германиевые смесительные СВЧ детекторы с устойчивыми характеристиками.

Тогда же возникла необходимость подготовки специалистов по физике полупроводников. По инициативе А.И. Берга для этого была создана кафедра «Физика полупроводников» на физическом факультете МГУ. Руководителем кафедры стал профессор С.Г. Калашников, а я – сотрудником этой кафедры.

Тут же возникли проблемы. Что читать и как читать? Это всё впервые! Сергей Григорьевич стал читать «Физику полупроводников», а мне поручил «Физику полупроводниковых приборов». Это была трудная задача. Пришлось составлять лекции по материалам статей в журналах и по результатам своих исследований селеновых и германиевых диодов или детекторов.



Н.А. Пенин с коллегами из МГУ.

Наряду с разработкой технологии изготовления детекторов был выполнен ряд исследований легированного германия и разработана методика определения параметров вольтамперных характеристик детекторов. Оказалось, что в известной формуле вольтамперной характеристики $I=I_0(\exp(\alpha U)-1)$, где U – приложенное напряжение, коэффициент α в точечных сварных контактах при комнатной температуре был равен не 38, как это следовало из теории Бете, а 18-ти. Это не соответствовало теории Бете и теории Шоттки.

Концентрация и подвижность электронов в кристаллах германия определялась методом Холла. Для определения времени жизни и диффузионной длины неравновесных электронов в германии мною были воспроизведены опыты Хейнса-Шокли.

Одним из важных параметров СВЧ диода было последовательное сопротивление контакта – сопротивление растекания тока в толщу полупроводника при токе в прямом направлении, так как детекторы работали при прямом напряжении смещения. У СВЧ детекторов с необходимыми свойствами оно составляло в среднем 6 Ом·см и совпадало с вычисленным для контакта диаметром в 5 микрон и удельного сопротивления германия 0,006 Ом·см.

Однако у диодов, изготовленных из германия с удельным сопротивлением в несколько Ом·см, сопротивление растекания оказалось заметно меньше вычисленного и, более того, уменьшалось с увеличением величины прямого тока. Предположение о поверхностной утечке тока не оправдалось. Тогда мы приписали это непонятное увеличение концентрации носителей заряда в диодах, изготовленных из германия с более высоким удельным сопротивлением, увеличению концентрации носителей заряда из-за приложенного напряжения смещения. Потом оказалось, когда появилось краткое сообщение в журнале *Physical Review*, что это вызвано инжекцией неосновных носителей



На защите диссертации (1955 г.).

Первый ряд справа налево: 2-й – *Н.А. Пенин*, 4-й – *С.Г. Калашников*.

заряда (дырок), т. е. диффузией носителей заряда, а не их дрейфом в электрическом поле. Понятие «инжекция» электронов нам еще не было известно. Было известно слово «инъекция» в медицине.

В процессе работы над СВЧ диодами со сварным контактом из низкоомного германия, $\rho < 0.006$ Ом·см, иногда наблюдалась инверсия знака выпрямления. Это противоречило термоэлектронному механизму выпрямления в диодах типа Шоттки. В то же время, существовала работа Френкеля и Иоффе, в которой обсуждался туннельный механизм прохождения тока сквозь потенциальный барьер, и, согласно которой, знак выпрямления должен быть противоположен обычно наблюдаемому [1,2].

Вскоре появилась работа Эсаки, в которой описывались германиевые диоды с туннельным механизмом прохождения тока в диодах [3] и, кроме этого, обладающие отрицательным дифференциальным сопротивлением при положительном напряжении смещения.

Оказалось (но уже после нашего переезда в Институт радиотехники и электроники – ИРЭАН), что достаточно было увеличить силу тока в прямом направлении в наших «аномальных» СВЧ диодах, чтобы наблюдать вольтамперную характеристику с участком отрицательного дифференциального сопротивления и тем самым подтвердить теорию Френкеля и Иоффе. Мы воспроизвели результаты Эсаки в тот же день, когда получили журнал с его статьей.

После завершения работы по созданию германиевых СВЧ детекторов мною были созданы первые биполярные германиевые транзисторы и первые полевые транзисторы типа, предложенного Шокли.

После завершения работ по темам «Контакт» и «Плоскость» с 1 января 1956 г. лаборатория, руководимая проф. С.Г. Калашниковым, была переведена в Институт радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭАН). Тогда, под руководством академика А.И. Берга, был создан новый институт Радиотехники и электроники Академии наук СССР.

С января 1956 по октябрь 1959 г. я старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники АН СССР. Здесь мною был выполнен ряд исследований диодов с вплавленными р-п переходами. В одной из работ было теоретически и экспериментально показано влияние поверхностной рекомбинации на границе с невыпрямляющим электродом на характеристики диодов с р-п-переходами.

Используя эти результаты, В. Пулторак из Института электронной технологии Польской академии наук создал уникальные по своим вольтамперным характеристикам германиевые диоды с вплавным контактом, у которых экспоненциальная зависимость тока от напряжения наблюдалась в пределах 5-ти порядков по току [4].

Мы подробно исследовали частотные свойства диодов с р-п-переходами и показали возможность раздельного определения зарядовой и диффузионной емкостей.

На основе исследований емкостных характеристик вплавных диодов были созданы первые параметрические диоды. Тогда же были выполнены более тщательные исследования туннельных диодов. Было обнаружено увеличение туннельной компоненты тока с увеличением концентрации глубоких центров рекомбинации (Ni) у вплавных диодов, изготовленных из низкоомного германия (0.002 – 0.004 Ом·см), т. е. туннелирование электронов с участием глубоких примесных уровней.

Кроме этого, мною вместе с К.В. Якуниной, были выполнены подробные исследования вольтамперных и емкостных характеристик вплавных диодов с целью проверки теории В. Шокли. Было показано, что сопротивление и емкость у германиевого р-п-перехода являются по своей природе диффузионными, что совпадало с теорией Шокли. В частности, экспериментально было исследовано влияние скорости рекомбинации у невыпрямляющего электрода на электрические характеристики диодов. Для этого были изготовлены диоды Шокли с невыпрямляющим контактом с разными скоростями рекомбинации и разной толщиной базы (слоя полупроводника).

Всё это время оставался нерешенным вопрос о механизме детектирования германиевых и кремниевых СВЧ диодов. С целью исследования механизма работы СВЧ детекторов мною вместе с Н.Е. Скворцовой были выполнены подробные исследования германиевых детекторов со сварным контактом и кремниевых детекторов с прижимным контактом в области сверхвысоких частот (в интервале длин волн от 3-х до 30-ти см). Оказалось, что свойства исследованных точечных детекторов хорошо описываются в рамках теории Шокли.

Это было удивительно, так как детекторы, изготовленные из сильнолегированного германия и кремния, представляли по своим характеристикам типичные диоды Шоттки. Это до сих пор остается загадкой. По частотным характеристикам удалось определить время жизни неравновесных носителей заряда и, таким образом, быстродействие детекторов.

Результаты исследований СВЧ диодов были обобщены авторами С.Н. Ивановым, Н.А. Пениным, Н.Е. Скворцовой, Ю.Ф. Соколовым в книге «Физические основы работы полупроводниковых СВЧ диодов», опубликованной в издательстве «Советское радио» (Москва, 1965 г.). Книга была переиздана в Англии под названием «Physics of microwave semiconductor diodes» в издательстве «London Iliffe Books LTD» в 1969 г.

Из-за различия научных интересов, моих и С.Г. Калашникова, я упрямил директора ИРЭАН, академика В.А. Котельникова, перевести меня в ФИАН СССР в лабораторию Б.М. Вула. В предварительном разговоре со мной Б.М. Вул сказал: «Ну что ж, примем Вас в свою лабораторию». С октября 1959 г. по настоящее время я – ведущий научный сотрудник, научный советник Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

В ФИАНе вначале мне была предложена работа по изучению взаимодействия примесей с мелкими энергетическими уровнями в кремнии методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). На создание экспериментальной установки ушел примерно один год. В это время были созданы: электромагнит с высокой однородностью магнитного поля (меньше 0.1 эрстеда при поле 3000 эрстед в зазоре между полюсами в 6 см и ширине полюсов в 200 мм), самостабилизирующийся выпрямитель на мощных

транзисторах для питания магнита со степенью стабилизации лучше $1 \cdot 10^{-5}$. В создании стабилизированного выпрямителя на транзисторах принимал участие сотрудник Б.Д. Копыловский.

Исследование взаимодействия примесных атомов проводилось на кремнии, легированном фосфором. В этих исследованиях принимал активное участие Б.Г. Журкин. В итоге было установлено, что при концентрации атомов фосфора порядка $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ две отдельные линии ЭПР изолированных атомов фосфора (линии сверхтонкого взаимодействия) исчезали благодаря перекрытию волновых функций и появлялась одна линия, соответствующая обменному взаимодействию между атомами фосфора. Это свидетельствовало об исчезновении изолированных атомов фосфора, тогда как электропроводность по постоянному току, при температуре жидкого гелия, еще отсутствовала. Электропроводность легированного кремния при этой температуре появлялась при концентрации фосфора примерно $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Далее была исследована зависимость энергии активации электропроводности в кремнии от концентрации фосфора и компенсирующей примеси бора и показана существенная роль взаимодействия ближайших соседних атомов примеси на положение края зоны проводимости. Модель объяснения влияния взаимодействия атомов примеси на положение края зоны проводимости предложил Б.А. Волков (тогда еще дипломник).

По результатам исследования взаимодействия примесных атомов в кремнии и исследования точечных и плоскостных диодов я в 1967 г. в ФИАНе защитил докторскую диссертацию на тему «Электронные процессы в сильнолегированных невырожденных полупроводниках и полупроводниковых диодах».

Далее мне пришлось участвовать и руководить большой работой по разработке и созданию гетеродинного примесного фотоприемника на основе германия, легированного цинком и сурьмой, для целей лазерной ИК-локации на волне 10,6 микрон. Основными исполнителями работы были В.А. Курбатов и Т.М. Бурбаев.

Основная характеристика гетеродинного фотоприемника – коэффициент преобразования мощности ИК сигнала в мощность сигнала на промежуточной частоте – зависела от концентраций цинка и компенсирующей примеси сурьмы и соотношения между ними. Основная технологическая трудность состояла в получении кристаллов германия с оптимальными концентрациями цинка и сурьмы, при которых время жизни неравновесных носителей заряда должно было быть около 10^{-10} сек. Была разработана технология выращивания легированных кристаллов, позволившая создать гетеродинные фотоприемники 10-микронного излучения с необходимыми характеристиками. Решающую часть разработки технологии и выращивания кристаллов германия с необходимыми параметрами выполнила сотрудница Н.Н. Лойко.

Для определения обнаружительной способности гетеродинных фотоприемников были необходимы два стабильных по частоте излучения лазера с возможностью плавной перестройки частоты одного из них. Это были очень дорогостоящие в то время лазеры. Тогда пришлось искать другие косвенные методы. Мною был предложен и реализован метод определения гетеродинных характеристик фотоприемников без применения смешения частот двух независимых лазеров. Метод был основан на модуляции излучения CO_2 -лазера, проходившего через кристалл германия, слабым электрическим полем и использовании гармоник ИК излучения на выходе модулятора в качестве принимаемого сигнала.

Когда мы осуществили модуляционный метод оценки гетеродинных свойств ИК фотоприемников, Б.М. Вул сказал: «Вот как хорошо, что мы не дали им денег на приобретение двух стабилизированных лазеров!»



*Конференция по физике полупроводников в МГУ. 1968 г.
Справа налево: Красилов А.В., Пенин Н.А., Гиппиус А.А.*



*Вручение наград в Кремле в 1953 г. Н.А. Пенину был вручен Орден Трудового Красного знамени.
1-й ряд: 4-й слева – А.И. Берг, 6-й – Ф.В. Гладков, 7-й – К.Е. Ворошилов; 3-й ряд: 6-й справа – Н.А. Пенин.*



*Защита кандидатской диссертации в ЦНИИ-108.
Председатель Ученого совета – А.И. Берг. 1946 г.*



60-летие Н.А. Пенина. 1972 г. Поздравление Б.М. Вула после доклада Н.А. Пенина.



Н.Н. Сибельдин и Н.А. Пенин.



*Н.А. Пенину 95 лет.
Сотрудники Отделения физики твердого тела и гости поздравляют юбиляра.
Н.А. Пенин сидит в центре.*

Для разработки и характеристики модулятора 10-микронного излучения были выполнены исследования эффекта разогревания дырок в германии р-типа слабым электрическим полем. Эти исследования выполнил А.П. Болтаев. Был создан модулятор 10-микронного излучения из германия р-типа с предельной частотой модуляции более 10 ГГц, что позволило просто и правильно определять смесительные свойства ИК фотоприемников.

В результате работы нами были разработаны и изготовлены несколько фотоприемников на основе германия, легированного цинком и сурьмой, работающих при температуре 60 К, что достигалось стабилизированной откачкой пара жидкого азота. При мощности гетеродина в 50 мВт и оптимальном токе постоянного смещения чувствительность фотоприемников составляла примерно 4-5 фотонов в секунду 10-ти микронного излучения. На этом работа была закончена.

В связи с возможностью использования гетеродинных приемников из примесного германия в импульсном режиме при высокой мощности гетеродина были выполнены исследования нелинейности фотопроводимости германия с разными примесями (цинк, ртуть, кобальт). Импульсные гетеродинные фотоприемники были необходимы для измерения излучения плазмы в установке Токамак.

По мере расширения исследований фотоэлектрических и оптических свойств примесного германия были выполнены исследования рекомбинационного излучения германия, легированного цинком, ртутью и бериллием и частично компенсированного сурьмой. Эти исследования были выполнены В.А. Курбатовым (дипломная работа) и Т.И. Галкиной.

Часть сотрудников руководимого мною сектора (Т.И. Галкина, Н.Н. Сибельдин), заинтересовались проблемой возникновения электронно-дырочных капель в германии при достаточно интенсивном оптическом возбуждении при низких температурах. Ими были изучены ряд свойств электронно-дырочных капель, важных для понимания условий возникновения «электронно-дырочной жидкости» в германии.

В то время мои интересы были связаны с изучением вопросов, оставшихся неисследованными при разработке гетеродинных фотоприемников 10-микронного излучения.

В 1990 году наш сектор был ликвидирован, а меня, как пенсионера, перевели по приказу директора в научные советники.

После этого я стал заниматься теоретическим исследованием некоторых вопросов, возникших в процессе исследования и разработки гетеродинного фотоприемника 10-микронного излучения.

Ниже приведены результаты исследований некоторых проблем:

Как продолжение исследований фотоэлектрических свойств германия мною теоретически была исследована оптическая и тепловая стимуляция примесной фотопроводимости полупроводника, легированного примесью с мелким энергетическим уровнем. В результате было показано, что на основе фототермической ионизации могут быть созданы селективные фотоприемники, фоточувствительность которых определяется дополнительной оптической подсветкой (стимуляция) излучением другой длины волны. В частности, оценена чувствительность фотоприемника из германия, легированного сурьмой, при микроволновой стимуляции фоточувствительности.

* * *

Мною было проанализировано влияние ударной ионизации примесных атомов на умножение фотовозбужденных носителей заряда и, соответственно, фоточувствительность фотоприемников в этом режиме. Было показано, что время жизни неравновесных электронов и, соответственно, фоточувствительность имеют максимум при критическом (пробивном) поле.

Было скорректировано условие пробоя примесного полупроводника и показано, что при пробивном электрическом поле степень ионизации примесных атомов остается еще незначительной.

* * *

При измерении частотных характеристик различных полупроводниковых структур в ряде случаев возникает изменение знака измеряемой емкости структуры при изменении приложенного напряжения смещения – эффект «отрицательной» емкости (ОЕ). Природа этого эффекта была недостаточно выяснена. В связи с этим мною был теоретически рассмотрен эффект отрицательной емкости в однородной полупроводниковой структуре. Показано, что отрицательная емкость возникает, если электропроводность в структуре имеет инерционный характер, определяемый временем свободного пробега, а реактивная составляющая тока превышает максвелловский ток смещения. Другими словами, отрицательная емкость существует при условии, когда максвелловское время диэлектрической релаксации меньше характерного времени релаксации проводимости (времени свободного пробега) или времени жизни неравновесных носителей заряда, если электропроводность полупроводника имеет дрейфовый характер.

С увеличением частоты переменного напряжения отрицательная емкость сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем уменьшается и меняет знак. В однородном полупроводнике изменение знака емкости происходит на частоте, соответствующей плазменной частоте. На частотах выше плазменной емкость всегда положительна. Работа получила широкий отклик в зарубежных исследованиях. Эффект отрицательной емкости наблюдался в нашей лаборатории в гетероструктурах типа Ni-TiO₂-p-Si и в гетероструктурах на основе кремния. В диодах с p-n переходами и тонкой базой, в которых сопротивление и емкость являются диффузионными, эффект отрицательной емкости отсутствует. Это означает, что ОЕ возникает только при дрейфовом механизме тока. Экспериментально эффект ОЕ возникает при представлении полной комплексной проводимости структуры эквивалентной схемой, состоящей из параллельно соединенных резистора и конденсатора.

* * *

В известных опытах Толмена по исследованию инерции электронов в металлах с различным типом проводимости всегда обнаруживалась только электронная проводимость. Это означало, что в опытах Толмена проявлялась инерция электронов, а не дырок, несмотря на дырочную проводимость исследуемого металла.

Исследование возникновения магнитного поля в неравномерно вращавшемся сверхпроводящем кольце было вызвано возможностью проведения опытов Толмена со сверхпроводящим кольцом. Кроме того, это было связано с выяснением роли кинетической (механической) индуктивности в сверхпроводниках. В связи с этим было проанализировано влияние инерции сверхпроводящих электронов (или куперовских пар) на возникновение магнитного поля в неравномерно вращавшемся сверхпроводящем кольце. Было показано, что после ускорения до постоянной скорости вращения или торможения до полной остановки магнитное поле, возникающее в кольце, определяется кинетической индуктивностью, т.е. инерцией сверхпроводящих электронов или куперовских пар. Гиромангнитное отношение сверхпроводящего кольца в установившемся состоянии вращения принимает известное выражение, если кинетическая индуктивность кольца существенно превышает магнитную.

* * *

Известно, что параметрические диоды позволили значительно снизить уровень шума и повысить чувствительность современной высокочастотной радиоаппаратуры. На основании этого представлялось возможным повысить чувствительность и снизить уровень шума в фотоемкостных приемниках – фоточувствительных конденсаторах, у которых одним электродом является полупроводник, легированный необходимыми примесями. Фотоемкостный эффект в МДП конденсаторах представляет интерес для создания параметрических фотоприемников модулированного ИК излучения.

В связи с этим теоретически были рассмотрены емкостные и фотоемкостные свойства МДП конденсатора при низких температурах, при которых легирующие примесные атомы слабо ионизированы. Было показано, что в режиме плоских зон фотоемкостный ответ на ионизирующее излучение в примесной области имеет вид относительно узкого пика на оси напряжения смещения (селективность по напряжению), величина и положение которого, зависит от концентрации компенсирующей или антикомпенсирующей примеси. При этом максимум фототока не зависит от концентрации компенсирующей примеси.

Было показано, что в МДП конденсаторе с электродом из полупроводника р-типа при наличии донорной компенсирующей примеси фотоемкостная чувствительность проявляется при отрицательных (запирающих) значениях напряжения смещения, тогда как при наличии антикомпенсирующей акцепторной примеси максимум фотоемкостной чувствительности возникает при положительных напряжениях смещения. Показано, что фотоемкостная чувствительность МДП конденсатора экспоненциально возрастает с понижением температуры. Это связано с возникновением сингулярности в изменении концентрации фотоактивной примеси с понижением температуры. Все эти особенности проявляются, как было указано выше, в режиме плоских зон, т. е. в условиях компенсации контактной разности потенциалов или потенциалов, создаваемых заряженными примесными центрами в оксидном слое конденсатора.

Режим плоских зон в полупроводниковых структурах мало исследован. В то же время он обладает высокими спектроскопическими возможностями исследования примесных состояний в полупроводниках.

* * *

Монополярный МДП конденсатор с электродом из кремния, легированным индием и бором или другими подобными примесями, может быть использован как фотопараметрический детектор модулированного ИК излучения, чувствительный в ограниченной области напряжения смещения (селективность по напряжению смещения).

Положение максимума времени жизни на оси напряжения смещения зависит от концентрации компенсирующей или антикомпенсирующей примеси.

* * *

В полупроводниковых приборах с потенциальными барьерами, например в диодах, обычно измеряется эффективное или среднее время жизни. Однако в области режима плоских зон время жизни в области пространственного заряда барьера является функцией потенциала и, следовательно, зависит от координаты. Поэтому время жизни изменяется с изменением приложенного напряжения смещения.

Поэтому я рассмотрел влияние постоянного напряжения, приложенного к МДП конденсатору с электродом из монополярного примесного полупроводника, легированного примесью с глубоким уровнем, на время жизни неравновесных носителей и распределение времени жизни в барьере полупроводникового электрода при низких температурах. В результате было показано, что вблизи режима плоских зон (при ком-

пенсации контактной разности потенциалов) зависимость времени жизни носителей от потенциала на барьере имеет вид относительно узкого пика при некотором напряжении смещения (снова селективность по напряжению).

В полупроводнике р-типа максимум времени жизни возникает при отрицательном (прямом) потенциале и не зависит от концентрации компенсирующей примеси с мелким уровнем. С увеличением прямого напряжения смещения на барьере максимум времени жизни при заданных концентрациях примесей, остается неизменным и перемещается в области барьера, удаляясь от границы с диэлектриком вглубь полупроводникового электрода.

* * *

В последнее время (2005 год) я занимался изучением вопросов, связанных с активированной электропроводностью металлических гранулированных пленок, проблемой энергии активации металлических частиц наноразмеров (время туннелирования, роль сил изображения при туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер между металлическими частицами).

* * *

В дальнейшем пришлось изучать вопросы спиновой электроники, в частности, проблему гигантского магнетосопротивления (ГМС) в слоистых структурах с ферромагнитными тонкими пленками, разделенными тонким слоем немагнитного металла или диэлектрика.

[1] J. Frenkel, Phys. Rev., 36, 1604 (1930).

[2] J.I. Frenkel, A.F. Ioffe, Phys. Z. Sowietunion, 1, 60 (1932).

[3] L. Esaci, Phys. Rev., 109, 603 (1958).

[4] J. Pultorak, Electron Technology, 3, 13 (1970).

КОМАНДИРОВКА В ГЕРМАНИЮ

В 1945 году я работал в Научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) и занимался разработкой селеновых выпрямителей для нужд кинотехники и оборонных целей. В мае 1945 г. я был командирован в Германию в распоряжение комиссии, возглавляемой вице-адмиралом А.И. Бергом. Вместе со мною был командирован сотрудник В.Г. Комар. Нас вызвали в военкомат, выдали военное обмундирование, присвоили звание капитанов и выдали билеты на самолет в Берлин. В середине мая 1945 года мы вылетели в Берлин. В Германии мы должны были посетить ряд заводов, на которых производились селеновые выпрямители и ознакомиться с технологией их изготовления. В Берлине мы посетили завод фирмы АЕГ (AEG), а затем завод той же фирмы в местечке Гроссрешен (Grossreschen) вблизи Дрездена. Однако и здесь производство селеновых выпрямителей было остановлено из-за военного времени. В то время в Германии селеновые выпрямители производились только на заводе в городе Котбус (Kotbus), недалеко от Дрездена. Оказалось, однако, что на заводе в Котбусе главные специалисты отсутствовали (нам сказали, что накануне их увезли американские военные) и нам пришлось попросить мастера цеха по распоряжению военного коменданта изготовить несколько небольших партий селеновых выпрямителей по нашим указаниям и под нашим наблюдением. Изменяя режимы изготовления выпрямителей и внося свои коррективы, мы выяснили особенности немецкой технологии.

Пребывание в городе Котбус не обошлось без некоторых событий. Вдруг была объявлена военная тревога. Оказалось, что в местных лесах появилась группа немецких солдат. Нам было приказано никуда не отлучаться и находиться в комендатуре. Однако вскоре тревога была снята.

В Котбусе мы узнали о победе над Японией. Комендант собрал всех офицеров и устроил хороший праздничный обед. Мы тоже были приглашены. Изрядно все выпили в честь очередной победы. Еще в Берлине мы узнали об атомной бомбардировке Хиросимы в Японии.

Из Котбуса мы вернулись в Дрезден, а затем поездом возвратились в Берлин. Во всех вагонах окна были выбиты и мы сильно промерзли в своих шинелях, но всё обошлось благополучно. В Берлине мы жили в районе Карсхорст (Karshorst), недалеко от здания, где была принята капитуляция фашистской Германии.

Вскоре нас с В.Г. Комаром вызвали в комендатуру Берлина. Там меня назначили начальником специального эшелона для сопровождения его в Москву. Нашим войскам удалось захватить киноархивы Геббельса. Надо было срочно доставить их в Москву. Для охраны эшелона было назначено отделение солдат из штрафного подразделения. Их командир зачитал приказ и сказал: «Довезете эшелон, с вас снимется штрафная повинность». Надо сказать, что солдаты на всем пути до Москвы вели себя отменно; они посменно находились на вагонных площадках возле двух пульмановских вагонов, нагруженных киноматериалами и другими документами Геббельса.

В дороге не обошлось без приключений. Когда мы проезжали по Польше, на одной из станций, я уже не помню её название, наш эшелон загнали в тупик и начальник станции сказал, что нет паровозов. Так мы простояли двое суток, а эшелоны непрерывно проходили мимо. На этой станции начальником уже был поляк. Я взял с собой несколько наших солдат и потребовал немедленно отправить наш эшелон дальше. Сол-

даты блокировали помещение станции до тех пор, пока не был выделен паровоз. Это, к нашему счастью, помогло. Вскоре появился паровоз и мы благополучно доехали до границы. Ехали через Варшаву, Брест, Великие Луки, Волоколамск.



*Я и попутный офицер, майор,
обсуждаем ситуацию, когда нас
задержали поляки.*

По дороге случились еще две технические поломки. Сначала стал разваливаться один из вагонов с каким-то оборудованием; пришлось с помощью наших солдат перегружать его содержимое в новый вагон. Железнодорожники предлагали оставить груз, а затем они сами доставят его по назначению. Но мы считали это неприемлемым. Поэтому им пришлось маневрированием составами по железнодорожным путям подогнать пустой вагон на соседний путь, и поставить вагоны друг против друга. Солдаты перекинули доски между вагонами, и сравнительно легко перетащили по этому настилу оборудование в новый вагон. Пришлось выдать солдатам согревающее, они были очень довольны, и мы тоже.

Другое приключение произошло недалеко от Великих Лук. Из-за сильно холмистой местности на одном из подъемов разорвался наш состав, лопнуло сцепление, и половина состава уехала. Нам пришлось долго ждать, так как связи здесь не было. Примерно через сутки пришел паровоз и довез оставшуюся половину состава до ближайшей станции, где и произошло воссоединение.



Наш эшелон разорвался на подъеме. Мы остались в поле с половиной эшелона и ждем, когда придет паровоз за нами. Связи нет, поле. Делать нечего. Сфотографировались на память у какого-то верстового столба и ждем

В комендатуре станции Великие Луки я сдал свое личное оружие – пистолет, правда, трофейный.

Далее благополучно ехали через Ржев, Волоколамск и прибыли в Москву на Киевский вокзал. Отсюда два пульмановских вагона с архивами Геббельса были направлены по Павелецкой дороге в Государственное хранилище вблизи станции Белые Столбы.

Впечатление о Берлине и Дрездене было тяжелое. В Берлине разрушено много домов. Метро (Unterbahn) пробито во многих местах и начало действовать лишь на отдельных участках. Метро было очень мелкого залегания, непосредственно под мостовой. Рейхстаг был весь черный, с разбитым куполом и буквально был исписан нашими солдатами. Надписи говорили о многом: о том, кто писал, откуда родом и о тоске по родине, по родным, были и выражения ненависти к фашизму. А рядом с Рейхстагом образовался черный рынок: торговали чем угодно – от разных галантерейных мелочей до оружия, пушек и даже танков.

Как-то я шел по улице и вижу – стоит американский танк и на его башне сидят два танкиста. Когда проходил мимо, один из них сказал: «Hallo, captain, buy tank». Я ответил, что у нас своих достаточно.

Дрезден производил еще более тяжелое впечатление. Центр города был почти полностью разрушен. Однако железнодорожный вокзал был цел. В нижней, левобережной части города (река Эльба) стоял тяжелый трупный запах. Кружились стаи черных

воронов. Почему-то по ночам они собирались и сидели на перилах единственного уцелевшего моста через Эльбу. Были расчищены только некоторые проезжие части улиц. На развалинах множество записок, люди искали своих родных и близких. Знаменитый музей «Цвингер» сильно разрушен. На мостовой лежали останки различных скульптур – головы, руки, крылья ангелов и т. п. Окна выбиты, залы пустые. На башне музея купол был разрушен, но уцелела одна изогнутая ферма, на которой была укреплена скульптура ангела. Она чудом удержалась и качалась при порывах ветра. Всего не перечсть. Немцы говорили нам, что американские и английские самолеты бомбили Дрезден всю ночь, и погибло более 80-ти тысяч человек.

Удивительно и знаменательно, что завод фирмы АЕГ в местечке Гроссрешен остался невредимым, там не упала ни одна бомба. А всего-то от центра города Дрезден до пригорода Гроссрешен на трамвае было 20 минут езды. Кстати, завод фирмы АЕГ в самом Берлине также не пострадал.

БЕСЕДА Ф.А. ПУДОНИНА И В.М. БЕРЕЗАНСКОЙ С Н.А. ПЕНИНЫМ*

(в день 90-летия Н.А. Пенина)

В.Б.: Когда и где Вы начали заниматься электроникой?

Н.П.: Сначала на Московском электроламповом заводе (МЭЛЗ). Но, главным образом, в институте ЦНИИ-108. Это институт радиолокации. Он принадлежал Министерству обороны. Во время войны его организовали по распоряжению И.В. Сталина для создания и развития радиолокации. Директором института был назначен контр-адмирал академик А.И. Берг.

Для решения сложных проблем радиолокации А.И. Берг создал научный совет из известных физиков. Я помню не всех, но там были: В.А. Фок, М.А. Леонтович, Б.А. Введенский, С.Э. Хайкин, Ю.Б. Кобзарев и др.

Ф.П.: Это все такие известные люди.

Н.П.: Да. Мне повезло. Я сдавал Хайкину экзамен по физике, когда поступал на второй курс физфака МГУ.

Ф.П.: То есть, Берг этот совет фактически создал и организовал? Я никогда не думал, что именно он был у истоков современной электроники.

Н.П.: Я попал в этот институт в начале 1946 года по приглашению профессор С.Г. Калашникова потому, что уже имел некое отношение к полупроводникам, так как занимался созданием селеновых выпрямителей. В 108-м началась работа по созданию детекторов для сверхвысоких частот, для радиолокации на волне 3 см. Мне поручили разработку устойчивых СВЧ детекторов.

Вначале было не ясно, с чего начинать. Но неожиданно, – можно сказать, повезло, – появилась работа американцев по созданию устойчивых СВЧ детекторов из германия.

Я помню до сих пор, как в комнату, где я работал, быстро вошел в своем блестящем обмундировании А.И. Берг.

Ф.П.: Что, прямо в военной форме?

Н.П.: Да, и трясет журналом «Journal of Applied Physics», мартовским номером 1946 года: «Американцы сделали германиевые детекторы со сварным контактом, которые устойчивы и не боятся перегрузок. Нам немедленно надо заняться этим делом. Прочитайте и доложите мне свои соображения».

Ну, мы почитали. Что-то поняли, чего-то не поняли, и – к нему: «Аксель Иванович, германий нужен». Аксель Иванович: «Значит надо доставать. В чем же дело?» – «Аксель Иванович, мы объездили все институты. Нигде его нет. И понятия не имеют. В ГИРЕДМЕТе говорят: «А мы этой проблемой не занимаемся. Не наша область»». Тогда А.И. Берг по своим каналам, а он был тогда заместителем министра обороны, поручает достать германий за рубежом любой ценой. Примерно через месяц приходит к нам полковник и приносит 100 грамм германия. Правда, у них в Госбезопасности еще 100 грамм осталось, как государственный неприкосновенный запас.

Ф.П.: Понятно, это такие товарищи, что им это необходимо.

Н.П.: Мы начинаем с ним работать, попробовали создать детектирующий контакт, не получается. Оказалось, что это загрязненный германий. Не работает.

* Аудиозапись и расшифровка В.М. Березанской.

С этого момента началась у нас германиевая (и не только германиевая) электронная эпопея.

Ф.П.: Вы потом очищали этот германий как-то?

Н.П.: Да, но надо было сначала проанализировать химически, а потом пытаться очистить.

Ф.П.: Тогда это была, наверное, не простая задача?

Н.П.: Это верно. Тогда никто не знал как это делать. Я иду к своему знакомому, инженер-полковнику К.В. Астахову из Военной академии химической защиты, – я там работал два года и там мы с ним научились чистить и легировать селен. Но, когда стало необходимым очистить загрязненный германий, мы долго думали, как же быть. Перебрали все книжки какие были, химические справочники. И решили, что будем делать так, как с селеном.

Ф.П.: А как Вы селен чистили? Методом Чохральского?

Н.П.: Нет, это сначала была химическая технология. А делали так. Клали навеску селена в кварцевую трубку, пропускали хлор, нагревали. Получался хлористый селен, а потом восстанавливали в потоке сухого горячего водорода.

В случае германия такая процедура приводила к образованию хлористого германия. Он оказался бурой жидкостью. После этого его надо было дисциплинировать. Эта дисциплинация проводилась в стеклянной аппаратуре. Примерно шести-восьмикратная, точно не помню сколько дисциплинаций я тогда делал.

Ф.П.: Вы сами делали?

Н.П.: Лично сам. У меня был навык стеклодува, что очень помогло. Я работал один, в мою комнату никого не пускали. У меня за дверью стояла охрана.

Ф.П.: (*Смеется*). Ничего себе.

Н.П.: Была такая ситуация. Институт был оборонный. Поэтому служба безопасности была поставлена на высоком уровне. Там же в своем кабинете сидел Маленков – начальник Третьего комитета, который занимался радиолокацией. Поэтому охрана была кремлевской.

Я один должен был всё сделать своими руками. Никто больше не мог тогда это сделать.

Ф.П.: Да, вообще говоря, это ответственное было дело.

Н.П.: Ну как я поступил? Все 100 грамм германия я не мог пустить в работу. Взял одну треть и решил что получится, то получится.

Ф.П.: Это верно. Я тоже также сделал бы.

Н.П.: Поначалу я работал с тридцатью граммами. Когда после многократной дисциплинации получилась прозрачная жидкость хлористого германия, в сосуд с этой жидкостью я добавил хорошо дисциплинированной воды. Произошла реакция замещения. Получилась соляная кислота, а окись германия GeO осела на дно сосуда. Получился белый порошок. Тут мы допустили большую ошибку. Оказалось, что окись германия немного растворима. Поэтому мы потеряли немного германия, вылив жидкость в раковину.

Ф.П.: Да, это неприятно.

Н.П.: Мы этого не знали. Нас не осудили.

Ф.П.: Еще бы осуждать. Процесс познания идет не просто.

Н.П.: Потом, когда получили окись германия, надо было восстановить его до чистого германия. Это было уже понятно как делать. Кварцевая трубка, сухой водород, высокая температура. В конце концов, получили порошок чистого германия. Ну, а дальше была уже технология получения монокристалла германия. Поначалу не получилось, так как мы начали нагревать порошок, насыпанный в графитовый тигель. При нагревании, примерно около двухсот градусов, порошок вдруг расплылся по всему колпаку установки.

Ничего не осталось в тигле. Беда. Пришлось колпак промывать дисциллированной водой и фильтровать, чтобы собрать распылившийся порошок – спасти потерю.

Ф.П.: Как же Вы потом поступили?

Н.П.: Под огромным давлением порошок спрессовали и получили небольшие цилиндрические палочки – штабики. Когда их начали плавить в тигле, вдруг появилась капелька расплавленного германия. Мы были бесконечно счастливы, что, в конце концов, получился жидкий германий. Дальше всё было уже ясно. Опустили кусочек старого германия до соприкосновения с расплавленным, и стали медленно его поднимать. И на него вырос кусочек чистого кристаллического германия.

Ф.П.: Да, интересно.

Н.П.: После этого началась разработка методики получения кристаллов. Испробовали несколько методов. В частности, растили по методу Бриджмена. Однако это было плохо: получались кристаллы с крупными зёрнами разной ориентации – крупные домены.

Ф.П.: Такие зёрна здоровенные.

Н.П.: В конце концов сделали металлическую установку для выращивания монокристаллов по методу Чохральского. Технически это была очень трудная работа, потому что конструктивно не сразу всё понимали.

Ф.П.: Я думаю, что это и сейчас без соответствующей подготовки тяжело сделать. Сейчас никто не сделает такого.

Н.П.: Дело в том, что это метод медленного, без вибраций, «вытягивания» кристалла из расплава по мере его наращивания. Хорошо помогли радиолокаторщики. У них были антенны, которые могли поворачиваться очень плавно на любой угол. Вот эту систему поворота мы использовали для того, чтобы опускать затравочный кристалл в жидкий германий и медленно поднимать по мере роста кристалла. В конце концов мы получили монокристаллический германий. Это был первый монокристалл, который был выращен по методу Чохральского примерно в середине 1948-го года.

Но потом Б.М. Вул говорил и писал, что германий был впервые выращен в ФИАНе. А в ФИАНе началась работа только тогда, когда германий уже пошел другой, собственный, полученный в ГИРЕДМЕТе.

Ф.П.: А те сто грамм откуда Вам привезли? Это был наш, российский германий или из-за рубежа?

Н.П.: По слухам, которые шли от разведчиков, из Бельгийского Конго.

Ф.П.: То есть из Африки.

Н.П.: Где-то там была фабрика, на которой получали сырец германия. Он был сильно загрязнен железом. Пришлось с ним повозиться, очищать. То, что я Вам уже рассказывал.

Ф.П.: А сейчас, если попадет такой германий к нам, я сомневаюсь, что у нас его так просто очистят.

Н.П.: Ну, сейчас уже его делают в ГИРЕДМЕТе. Трудность в том, что германий – рассеянный элемент. Он находится в каменных углях и в отходах после сжигания угля. Большие терриконы вблизи шахт стали перерабатывать с целью получения германия.

Ф.П.: Сейчас-то, конечно, делают. Я говорю о том германии, который попал к Вам. Сделать германий чистым, не зная технологии, я думаю, быстро никто не смог бы в ФИАНе. Я очень сомневаюсь, чтобы сделали это. Потому что, мне кажется, что навыки такой работы уже утрачены. Все привыкли, что есть чистый германий. И всё. Никто и не задумывается как и что было сделано.

Н.П.: После того, как мы поработали с привезенным из-за рубежа германием, стало ясно, что его надо делать у себя. И тогда А.И. Берг добился постановления Прави-

тельства, в котором ГИРЕДМЕТ обязали заниматься переработкой шлаков угля для получения германия.

Ф.П.: У нас угля все-таки добывали много...

Н.П.: Все терриконы стали перерабатывать. Они пошли на добычу германия. Там, примерно, было 0,01% германия от всего веса.

Ф.П.: Не так много, конечно, но всё равно. Если учесть, что это были огромные отвалы. По сотне тонн, если не больше.

Н.П.: Таким образом появился наш германий.

Ф.П.: Интересно. Я и не знал. Вообще не знал про эту историю ничего.

Н.П.: Ну, а потом, когда он появился, стало жить и работать куда легче.

Ф.П.: Потом германий как-то вышел из употребления. И основным полупроводником стал кремний. К тому же, в природе он более распространен.

Н.П.: Да. Дело вот в чём. Кремний, конечно, более пригоден для электроники, но тогда о кремнии не шла речь. Почему? Потому что технология кремния была сложнее, чем технология германия, из-за более высокой температуры плавления кремния.

Ф.П.: А вот почему? Казалось бы, наша планета почти вся кремниевая.

Н.П.: Да. По нему мы ходим.

Ф.П.: Казалось, взял и очистил его. Казалось бы, сложного ничего нет.

Н.П.: Совсем не так просто. Чтобы получить чистый кремний, нужна новая технология получения и выращивания кристаллов и соответствующая аппаратура. Нужен то ли кварц, то ли графит. Оказалось, что графитовые тигли загрязняют кремний.

Ф.П.: И конечно нужна более высокая температура.

Н.П.: Германий, оказалось, просто сделать потому, что он не растворяется в графите. А для кремния нужно было специальные тигли делать. А это – своя проблема оказалась. Только поэтому кремний пришел потом после германия. Конечно, кремний лучше и более пригоден по физическим свойствам. Почему? Потому, что ширина запрещенной зоны у него больше, температурная устойчивость больше и так далее. В конце концов, все компьютеры были сделаны на кремнии. Всё кончилось этим.

Ф.П.: Интересно всё это. Может быть, я этим мало интересовался, но, по-моему, нигде про это особо не написано. Как, что, почему? Все принимают как должное.

Н.П.: В данном случае, с германием, судьба сложилась так, что всё это проходило через меня. Так сложилось.

Ф.П.: Наверное, когда Вы работали, всё это не очень сильно оценивалось. Ну, подумаешь, кремний, германий. Это была Ваша повседневная работа. Так? Вот только сейчас начинаешь понимать, что на самом деле всё это было не так просто. И выбрать, и сделать. Это требовало больших усилий – обдумать, выбрать нужное направление, в котором двигаться. Всё было не очевидно.

Н.П.: Да, так было. Очистка германия. Как? Никто тогда этого не знал. ГИРЕДМЕТ и другие институты отказались. Тем более, условия были такие – материал ограничен, а ответственность огромная.

Ф.П.: Ну, еще бы. Когда за спиной стоит вооруженный охранник.

В.Б.: А как Вы себя чувствовали в такой обстановке? А если бы не получилось?

Н.П.: А я не думал об этом.

В.Б.: Это самое главное. Если бы думали, то, возможно, ничего не получилось бы.

Ф.П.: Науку все-таки интерес двигает – «что там дальше?»

Н.П.: Надо было делать, и мы делали, и пытались сделать. Было неясно как. Я советовался со своим товарищем по работе в Военной академии химической защиты инженер-полковником К.В. Астаховым, умницей. Он заведовал кафедрой неорганической химии Военной академии и много чего знал. Очень симпатичный был человек. Я

именно у него научился химии. Каким образом? Он сидит и принимает экзамены у своих курсантов, а я за перегородкой работаю. Так я всю неорганическую химию выучил. Получилось так, что я стал заправским химиком, и ко мне уже стали приходить в свое время именно как к химику.

Ф.П.: Если надо, все узнаешь и выучишь. За тебя эту работу никто не сделает. Это верно.

В.Б.: Николай Алексеевич, мне нужно знать, в каких областях физики Вы работали.

Н.П.: Сначала я учился на кафедре «Электронные процессы в вакууме и разреженных газах». Я учился как специалист по газовым разрядам.

Ф.П.: Так Вы, значит, специалист в том, чем я сейчас занимаюсь. У меня на установке имеются все эти процессы. Именно разряды в газах происходят.

Н.П.: По образованию я – газоразрядник.

Ф.П.: Это интересная область деятельности.

Н.П.: Будучи дипломником, я занимался исследованием фотоэлементов с газовым усилением в режиме Столетова. В стеклянной колбе, наполненной газом неон, имеется фотокатод. К аноду и фотокатоду приложено напряжение и благодаря ударной ионизации газа происходит усиление фототока. Это были первые газонаполненные фотоэлементы, которые использовались в первом звуковом кинофильме «Путевка в жизнь».

Ф.П.: Интересно. Я не знал. Что, действительно, в первом звуковом фильме это было использовано?

Н.П.: Да. Это был первый звуковой фильм, «Путевка в жизнь», на фотоэлементах, которые я делал моими собственными руками.

Сначала были фотоэлементы с газовым наполнением, потом появились вакуумные кислородно-цезиевые, затем и фотоумножители. Фотоумножители мы тоже делали в свое время.

Ф.П.: А когда Вы занялись именно полупроводниковой электроникой?

Н.П.: Когда вдруг стали необходимы для звукового кино селеновые выпрямители. Когда появились селеновые выпрямители, началась твердотельная электроника.

В.Б.: И все-таки, как назвать области физики, в которых Вы работали?

Н.П.: Физика твердого тела и твердотельная электроника.

Ф.П.: Валя занимается историей ФИАНа.

Н.П.: Я знаю.

Ф.П.: На самом деле, история очень важна. Сейчас мы можем это не осознавать. Вроде бы всё это очевидно. А пройдет лет сто, например, это будет страшно интересно. Да и сейчас я узнал много нового, честно говоря, у Вас. Первый звуковой фильм, первые советские транзисторы.

Н.П.: Кстати, сделать первые транзисторы – это была трудность, а главная проблема была – понять их физику. В них работает диффузия, а не дрейф носителей заряда.

Ф.П.: А Вы, когда делали транзисторы, как-то ориентировались, что транзистор – это аналог электронной лампы – триода.

Н.П.: Вообще была идея до этого – создание твердотельной электронной лампы. Такая идея была. Она плавала в воздухе.

Ф.П.: А Вы знаете, на самом деле где-то в 70-80-х годах в Зеленограде именно этим стали заниматься. Они начали на кремниевой подложке фактически рисовать лампы. Фотолитографией делали анод, катод, сетку и у них, фактически, эмиссия электронов была через диэлектрик, то есть фактически как бы вернулись к аналогам ламп, тех, которые были давно известны.

Н.П.: Нет. На самом деле эта идея появилась намного раньше, когда я кончал свою дипломную работу по фотоэлектронному умножению на газонаполненных фотоэlemen-

тах. Тогда же появилась идея создания усилителей нового типа. Усиление в газовом разряде – это одно, а усиление в электронных лампах – это совсем другое. Электронная лампа – это трехэлектродный прибор, в котором ток управляется третьим электродом – сеткой. Так нельзя ли поместить в кристалл сетку между двумя электродами и создать то же самое или похожее.

Ф.П.: Вы пробовали это сделать?

Н.П.: Да. Я пытался на селене. Для этого напылил один слой селена на металлическую подложку, затем тонкую решетчатую металлическую пленку (сетку) и второй слой селена с электродом. Что-то получалось, но плохо. Было как-то не до этого. Надо было сделать хорошие селеновые диоды.

Ф.П.: Я думал, что только в 80-е годы что-то возникло. А это оказывается было гораздо раньше.

Н.П.: В моем «триоде» усиление было чуть больше единицы. Эффект усиления, по-видимому, был, но очень мал. Было как-то не до этого эффекта. Когда этим заниматься? Задача у меня была другая. Надо было улучшить селеновые выпрямители, увеличить обратное напряжение селеновых диодов.

Много подобных проблем было. Похожее отвлечение было и в 108-м. Мы увидели излучение из р-п переходов. Я говорю шефу: «Давайте этим заниматься». – «Нет. Это не наша область».

Ф.П.: Ничего себе. Могли получить Нобелевскую премию.

Н.П.: Больше того, когда мы увидели, что в некоторых наших СВЧ диодах вдруг ток течет в другом направлении, возникли вопросы: «Что это такое? Почему характеристика диода «перевернулась»?» Оказалось потом, что у наших «аномальных» детекторов возник режим диодов Л. Эсаки. Только мы этого не понимали, потому что образования не хватало, а может быть, и времени.

Ф.П.: Тогда этим еще, наверное, и не пахло. Диоды Л. Эсаки когда появились?

Н.П.: Близкая ситуация возникла раньше. Была статья Иоффе и Френкеля относительно того, что в туннельном диоде эффект выпрямления переменного тока имеет другой знак. Не тот, который в барьере Шоттки. И мы приготовились это исследовать. Для этого был приготовлен сильно легированный германий с удельным сопротивлением меньше 0,006 Ом-см. Но нам не повезло – судьба. В это время мы переезжали из института ЦНИИ-108 в ИРЭ. На этом потеряли целый год. А когда переехали в ИРЭ, вдруг появилась статья Л. Эсаки.

Ф.П.: Это какие годы? Это было уже ближе к 60-м?

Н.П.: 56-й или 57-й год. Когда поняли: «Бог ты мой. У нас уже готов сильно легированный германий, сделанный еще в 108-м. Проверили. Увидели и изменение знака выпрямления, и участок характеристики с отрицательным сопротивлением в проходном направлении. Эсаки был прав. Если бы мы увеличили прямой ток в наших «аномальных» СВЧ диодах раньше, еще в 108 -м, то, может быть, мы и не поняли бы, а может быть и поняли, так как статью Иоффе и Френкеля мы уже знали. Не хватило знания и времени.

Ф.П.: Вообще, часто так получается. Занимаешься чем-то, что-то получается, обращаешь на что-то внимание, что-то в этом «есть», однако продолжаешь заниматься своими делами дальше, а потом выясняется через сколько-то лет, что там такое явление, которое всё на новую ступень ставит.

Н.П.: Когда имеется целевая задача, очень трудно отвлечься.

Ф.П.: Я тут согласен. Конечно.

Н.П.: Чтобы заняться чем-то интересным, что по дороге появилось, надо отвлечься от своей задачи, и необходимо время. Это одна из причин. Мы всё время спешили,

спешили, спешили. Ну, как же? У американцев радиолокация есть, а у нас еще толком нет. Значит, надо срочно, срочно, срочно.

Ф.П.: Мне приятель рассказывал, что он занимался, и Вы тоже, лазерной локацией на CO_2 лазере.

Н.П.: А как же. Десять лет на это потратил.

Ф.П.: Т. е. Вы хотели сделать локатор на CO_2 ? А, вообще, его сделали в конце концов?

Н.П.: Практически сделали много. Оставалось создать практическое оборудование, как говорили, «железо». Потом американцы закрыли программу «звездных войн», и все эти работы у нас прекратились. И поэтому наши исследования в ФИАНе были просто остановлены.

Ф.П.: Успехи там были?

Н.П.: Успехи были.

Ф.П.: Я думаю, что, может быть, это еще вернется.

Н.П.: В конце концов, наш успех с германиевым гетеродинным приемником пригодился для исследования ТОКАМАКа. Там нужно было измерять 10-микронное излучение. Оказалось, что наши гетеродинные приемники для этого пригодны. Но ТОКАМАК тоже закрылся.

Ф.П.: У нас страна такая.

.....

Н.П.: Я ведь экспериментатор. Я всё делал своими руками. А теперь я что? Квази-теоретик.

Ф.П.: Нет. Я бы так не сказал, потому что можно, конечно, всё делать своими руками. Но у Вас есть опыт. Вы представляете, что может быть, как и что происходит. Это на порядок важнее.

Н.П.: Я занимаюсь, обдумываю свои старые проблемы, элементарные.

Ф.П.: Ничего себе, элементарные. Я честно скажу, вот эту отрицательную емкость, которой Вы занимались, я до сих пор до конца не понимаю.

Н.П.: Я же сказал тогда на семинаре, когда Силин спросил: «А зачем Вам нужна отрицательная емкость?» Я ответил: «Она мне совсем не нужна. Её не существует». На самом деле это просто экспериментальная традиция, связанная с особенностью метода измерения импеданса образца. Например: измеряю мостом какую-то емкость, и вдруг во время изменения напряжения или частоты она меняет знак. Это не значит, что она стала отрицательной. Это означает, что изменился знак или фаза. А что на самом деле изменилось? Надо заниматься физикой этого.

Ф.П.: Я Вам скажу другую вещь. У меня с ИСАНом была опубликована последняя работа, в которой мы рассмотрели диэлектрическую проницаемость ϵ у тонких пленок, как она зависит от толщины, почему. Мы рассмотрели по отдельности мнимую часть и действительную часть, и заметили, что действительная часть ϵ от толщины меняет знак. Мы не знаем, как объяснить это. Экспериментальный факт. По крайней мере, при двух толщинах знак изменился. До сих пор мы не знаем, почему это происходит.

Н.П.: Забавно. Очевидно, это связано с поляризацией пленки.

(Заходит К.К. – секретарь отделения.)

К.К.: Жорес Иванович Алферов Вам прислал поздравление по почте. Без подписи, потому что по E-mail.

Н.П.: Жорес Иванович! Я с ним знаком бог знает с каких времен. С того времени, когда мы начали делать транзисторы. Он тогда был младшим научным сотрудником академика В.М. Тучкевича. После того, как мы в 108-м сделали СВЧ детекторы (дио-

ды), правительством была поручена работа по созданию транзисторов сразу четырем институтам по одному и тому же техническому заданию.

В.Б.: Это в каком году было?

Н.П.: Это было в 1953 или 1954 году.

Ф.П.: Сталин любил такие конкурсы устраивать.

Н.П.: Для создания транзисторов были привлечены сразу четыре института: ЦНИИ-108, как головной, ФИАН, Физико-технический институт АН и Фрязинский институт НИИ-160. Всем было поручено создание плоскостных транзисторов на германии. Тогда еще не было кремния. Три института, кроме НИИ-160 – он тогда переезжал в Москву, начали работать.

И удивительно, вдруг все стали скрывать всё друг от друга.

В.Б.: Но победили Вы?

Н.П.: В общем, да. Только это выяснилось на приемной комиссии, которая была огромной. Когда испытали и сравнили все транзисторы и технологии, то выяснилось, что наша технология оказалась самой оптимальной. Всего 10-15 минут было достаточно, чтобы вплавить кусочек индия в германий. Больше не надо. А в ФИАНе грели по 6 часов. А зачем? Неизвестно зачем. Физтех вплавлял тоже такого порядка. И выяснилось еще, что наши транзисторы были самые высокочастотные, порядка 80 МГц.

Ф.П.: Не очень большая по теперешнему времени.

Н.П.: Да. Такая предельная частота была у наших первых транзисторов. В других институтах она была заметно ниже.

Жорес Иванович был тогда одним из лаборантов и участвовал в измерениях транзисторов в этой приемной комиссии.

Тогда в ФИАНе этим занимался А.В. Ржанов.

Ф.П.: Ржанов? Это который сейчас в Новосибирске?

Н.П.: Да. Потом он переехал в Новосибирск, так как не поладил с Бенционом Моисеевичем Вулом. Они с Вулом разошлись. У них разные мнения были обо всём.

Ф.П.: Ржанов. А я думал, что он стал известным человеком, когда уже в Новосибирск уехал.

Н.П.: Нет. Он стал более или менее известным уже здесь, в ФИАНе. В основном, он занимался поверхностной рекомбинацией. При нем была группа довольно хорошая. А потом они как-то не сошлись в разных аспектах жизни с Вулом, и он уехал в Новосибирск вместе с несколькими своими сотрудниками. Звал и меня.

Ф.П. Вул был своеобразный человек. Мне кажется, что он все-таки немножко притормозил развитие электроники.

Н.П.: Я так прямо утверждать не могу, но могу сказать, что конкретно транзисторной проблемой он вообще не занимался. Вул с одной из сотрудниц несколько лет исследовал на сколотой поверхности кристалла полупроводника уровни Тамма, которые в чистом виде не существуют. Отставание в электронике заметно было в ФИАНе, но в стране электроника стала развиваться быстро. Построили Зеленоград для этого.

У нас в 108-м возникла другая проблема – решили закрыть лабораторию по полупроводникам, потому что институт 108-й – это институт радиолокационный, радиотехнический. Поэтому решили перевести лабораторию Калашникова в Академию наук. Берг тогда создавал новый институт в Академии наук, институт Радиоэлектроники – ИРЭ. И нас предполагалось перевести в ИРЭ. И с начала 1956 года я уже был в ИРЭ. Но в ИРЭ я пробыл недолго, до 1959 года. А в 1959 году по моей просьбе приказом по АН я был переведен в ФИАН.

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ Н. А. ПЕНИНА



Родился 26 апреля 1912 г. в деревне Кушелово Ошейкенской волости Волоколамского уезда Московской губернии. Сейчас – это селение Кушелово Лотошинского района Московской области. В 1924 г. окончил Кушеловскую 4-летнюю школу.

В 1927 г. окончил Детгородскую советскую трудовую школу семилетку при Волоколамском детском городке им. III-го интернационала, помещавшуюся тогда в бывшем Иосифо-Волоколамском монастыре.

В 1931 г. окончил Московский техникум электропромышленности им. Л.Б. Красина при Московском электроламповом заводе (МЭЛЗ).

С февраля 1930 по сентябрь 1934 г. работал техником на Московском электроламповом заводе (МЭЛЗ).

С сентября 1934 по июнь 1939 г. студент Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) на кафедре «Электрических явлений в вакууме и разреженных газах».

С сентября 1940 по декабрь 1945 г. научный сотрудник Научно-исследовательского кино-фото института (НИКФИ).

С декабря 1945 по декабрь 1956 г. научный сотрудник Центрального научно-исследовательского радиотехнического института (ЦНИРТИ), тогда ЦНИИ-108 Министерства обороны.

С января 1956 по октябрь 1959 г. старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ).

С октября 1959 г. по настоящее время ведущий научный сотрудник, затем научный советник Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

* * *

С сентября 1948 по февраль 1960 г. ассистент и доцент кафедры общей физики и затем кафедры физики полупроводников Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (по совместительству).

С сентября 1960 по июль 1975 г. доцент кафедры полупроводниковых приборов Московского энергетического института (МЭИ) (по совместительству).

С января 1975 по февраль 1987 г. член секции по радиоэлектронике в Комитете по ленинским и государственным премиям.

С июля 1975 по 1989 г. член экспертной группы по экспериментальной физике в Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

* * *

Апрель 1949 г. Присвоена ученая степень кандидата технических наук. Диссертация на тему «Исследование селеновых выпрямителей».

Октябрь 1950 г. Присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по радиотехнике.

Январь 1968 г. Присвоена ученая степень доктора физико-математических наук. Диссертация на тему «Электронные процессы в сильнолегированных невырожденных полупроводниках и полупроводниковых диодах».

Сентябрь 1978 г. Присвоено ученое звание профессора по физике полупроводниковых приборов.

1951 г. Награжден Государственной (Сталинской) премией за работу в области связи.

Сентябрь 1991 г. Присвоено звание «Заслуженный деятель науки РСФСР».

* * *

Награды:

Апрель 1948 г. Медаль «В память 800-летия МОСКВЫ».

Ноябрь 1951 г. Медаль «За трудовую доблесть».

Август 1953 г. Орден «Трудового красного знамени».

Июль 1971 г. Орден «Знак почета».

Апрель 1970 г. Медаль «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина».

Март 1991 г. Медаль «За доблестный труд в Великой отечественной войне 1941- 1945 гг.».

Март 1995 г. Медаль «50 лет победы в Великой отечественной войне 1941-1945 гг.».

Февраль 1997 г. Медаль «В память 850-летия МОСКВЫ».

Сентябрь 2002 г. Орден «Почета».

* * *

Аспиранты и соискатели:

Кандидаты наук: А.С. Алексеев, М.А. Берг, А.П. Болтаев, Т.М. Бурбаев, М.Г. Галкин, П.С. Гладков (Болгария), Б.Г. Журкин, Н.Е. Скворцова, Н.Н. Соловьев, К.В. Черкасс.

Доктора наук: Б.А. Волков, Т.И. Галкина, С.Н. Иванов, В.А. Курбатов.

Стажеры:

Ю.В. Настаушев (Новосибирск), П.С. Гладков (Болгария), Прем Сваруп (Индия).



СПИСОК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

1. Н.А. Пенин. Влияние метастабильных атомов на инерцию газонаполненных фотоэлементов. ЖТФ, 1939, т. 9, № 19, с. 1712-1718.
2. Н.А. Пенин, К.В. Астахов. Влияние примесей к селену на электрические свойства селеновых выпрямителей. ЖТФ, 1946, т. 16, № 2, с. 199-206.
3. А.П. Сажин, В.Г. Комар, И.Н. Осколков, И. Цедербаум, Н.А. Пенин. Селеновый вентиль. Труды НИКФИ. 1946, с. 46.
4. К.В. Астахов, Н.А. Пенин, Э.П. Добкина. Поверхностное натяжение жидкого селена и его зависимость от температуры. ЖФХ, 1946, т. 20, № 4-5, с. 403-408.
5. К.В. Астахов, Н.А. Пенин, Э.П. Добкина. Плотность и её термический коэффициент у жидкого селена. ЖОХ, 1947, т. 17, № 2, с. 378-381.
6. В.Г. Алексеева, С.Г. Калашников, Н.А. Пенин. Германиевые детекторы со сварным контактом. Вестник информации комитета № 3 при СМ СССР, 1948, № 5-6, с. 61-64.
7. С.Г. Калашников, В.Г. Алексеева, Н.А. Пенин. Изготовление и исследование германиевых детекторов. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1949, в. 15, с. 73-86.
8. В.Г. Алексеева, С.Г. Калашников, Н.А. Пенин. Исследование пробоя германиевых детекторов со сварным контактом. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1950, в. 20, с. 3-21.
9. В.Г. Алексеева, С.Г. Калашников, Н.А. Пенин, Г.И. Рассушина, Н.Е. Скворцова. Влияние очистки германия на свойства германиевых детекторов. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1950, в. 21, с. 15-21.
10. Н.А. Пенин, К.В. Якунина. Получение электронно-дырочных переходов в германии методом диффузии. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1953, в. 36, с. 27-33.
11. Н.А. Пенин, Н.Е. Скворцова. Германиевые приемные детекторы. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1953, в. 36, с. 44-46.
12. Н.А. Пенин, Н.Е. Скворцова. Исследование режима работы германиевых смесительных детекторов 3-сантиметрового диапазона. Сб. Научных Трудов ЦНИИ-108, 1953, в. 36, с. 47-57.
13. Н.А. Пенин. Принцип действия кристаллических выпрямителей и усилителей. В кн. «Кристаллические выпрямители и усилители», Из-во «Советское радио», Москва, 1954, с. 5-24.
14. Н.А. Пенин. Физические основы действия кристаллических диодов и триодов. Радио, 1954, №№ 8, 9, 10.
15. С.Г. Калашников, Н.А. Пенин. Влияние частоты на выпрямительные свойства полупроводниковых диодов при малом переменном напряжении. ЖТФ, 1955, т. 25, в. 6, с. 1111-1123.
16. С.Г. Калашников, Н.А. Пенин, К.В. Якунина. Частотные свойства германиевых плоскостных диодов при малом переменном напряжении. Радиотехника и электроника, 1956, т. 1, в. 8, с. 1058-1070.
17. Н.А. Пенин, Н.Е. Скворцова. Свойства германиевых детекторов со сварным контактом на сверхвысоких частотах. Радиотехника и электроника, 1956, т. 1, в. 8, с. 1071-1079.

18. Н.А. Пенин. Влияние скорости рекомбинации у невыпрямляющего электрода на частотные свойства р-п-перехода для случая малых переменных напряжений. Радиотехника и электроника, 1957, т. 2, в. 8, с. 1053-1061.
19. Н.А. Пенин, К.В. Якунина. Зависимость емкости и сопротивления сплавных германиевых диодов от частоты и тока положительного смещения. Радиотехника и электроника, 1957, т. 2, в. 9, с. 1200-1209.
20. С.Г. Калашников, Н.А. Пенин. Твердый выпрямитель. Авторское свидетельство, 1957, № 107170.
21. Н.А. Пенин, Ф.С. Русин, Н.Е. Скворцова. Входные сопротивления германиевых и кремниевых детекторов в диапазоне сантиметровых волн. Радиотехника и электроника, 1958, т. 3, в. 4, с. 543-546.
22. Н.А. Пенин, К.В. Черкас. Влияние рекомбинации у невыпрямляющего электрода на свойства сплавных германиевых диодов. Радиотехника и электроника, 1958, т. 3, в. 12, с. 1495-1500.
23. Н.А. Белова, А.Н. Ковалев, Н.А. Пенин. Влияние генерации носителей заряда в запиорном слое на обратную ветвь вольтамперной характеристики германиевых диодов. ФТТ, 1960, т. 2, в. 10, с. 2647-2654.
24. Б. Ануфриев, С.Б. Даховский, Б.Д. Копыловский, Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Регулятор тока электромагнита на полупроводниковых диодах. ПТЭ, 1962, в. 1, с. 129-131.
25. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Влияние концентрации атомов примеси на спектр электронного парамагнитного резонанса доноров в кремнии. ФТТ, 1964, т. 6, в. 4, с. 1141-1144.
26. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин, Б.А. Волков. Влияние компенсации на вид спектров ЭПР в кремнии п-типа. ФТТ, 1964, т. 6, в. 8, с. 2558-2560.
27. С.Н. Иванов, Н.А. Пенин, Н.Е. Скворцова, Ю.Ф. Соколов. Физические основы работы полупроводниковых СВЧ диодов. Из-во «Советское радио», 1965, Москва, 188 стр.
28. Н.А. Пенин, Б.Г. Журкин, Б.А. Волков. Влияние концентрации доноров и акцепторов на электропроводность сильнолегированного кремния п-типа. ФТТ, 1965, т. 7, в. 11, с. 3188-3198.
29. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Влияние компенсации на обменное взаимодействие доноров в сильнолегированном кремнии п-типа. ФТТ, 1965, т. 7, в. 11, с. 3204-3208.
30. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Температурная зависимость линий сверхтонкого взаимодействия в спектрах ЭПР фосфора в кремнии. Письма в ЖЭТФ, 1965, т. 2, в. 1, с. 21-23.
31. Т.И. Галкина, Н.Б. Корнилова, Н.А. Пенин. О структуре спектра рекомбинационного излучения диффузионных диодов из арсенида индия. ФТТ, 1966, т. 8, в. 8, с. 2473-2475.
32. Т.И. Галкина, Н.А. Пенин, В.А. Рассушин. Определение энергетического положения акцепторного уровня кадмия в арсениде индия. ФТТ, 1966, т. 8, в. 8, с. 2488-2490.
33. Б.Г. Журкин, И.В. Кучеренко, Н.А. Пенин. Влияние одностороннего сжатия на прыжковую проводимость в р-Si. ФТТ, 1966, т. 8, в. 11, с. 3445-3447.
34. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин, Прем Сваруп. Влияние прыжкового движения электронов на спектр ЭПР фосфора в сильнолегированном кремнии п-типа. ФТТ, 1966, т. 8, в.12, с. 3550-3554.

35. Н.А. Пенин. Емкость запирающего слоя контакта металл-полупроводник с учетом концентрации основных носителей заряда. Радиотехника и Электроника, 1966, т.11, в. 7, с. 1303-1305.
36. Т.И. Галкина, Н.А. Пенин, В.А. Рассушин. Спонтанное рекомбинационное излучение диодов из арсенида индия. ФТП, 1967, т. 1, в. 2, с. 230-235.
37. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Влияние компенсации на сверхтонкое расщепление спектра ЭПР фосфора в сильнолегированном кремнии p-типа. Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 6, в. 10, с. 890-893.
38. Т.И. Галкина, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Об излучательном захвате электронов нейтральными и однократно заряженными ионами цинка в германии. Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 5, в. 9, с. 325-327.
39. Т.И. Галкина, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Примесное рекомбинационное излучение германия, легированного цинком и сурьмой. ФТП, 1967, т. 1, в. 11, с. 1659-1664.
40. Н.А. Пенин, Б.Г. Журкин, Б.А. Волков. Влияние одноосного сжатия и компенсации на ЭПР фосфора в сильнолегированном кремнии p-типа. Труды 9-ой международной конференции по физике полупроводников, Москва, 1968, с. 1185-1189.
41. Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин. ЭПР бора в бездислокационных кристаллах кремния. ФТП, 1968, т. 2, в. 6, с. 827-829.
42. Н.А. Пенин, Т.И. Галкина, Н.Д. Тяпкина. Излучательный захват электронов отрицательными ионами и нейтральными атомами бериллия в германии. ФТП, 1969, т. 3, в. 2, с. 283-284.
43. А.С. Алексеев, Т.И. Галкина, Б.Д. Копыловский, Н.А. Пенин. Излучательный захват электронов нейтральными атомами ртути в германии. ФТТ, 1970, т. 12, в. 7, с. 2425-2446.
44. В.Б. Гиноман, П.С. Гладков, Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Зависимость сверхтонкого расщепления от одноосного сжатия в спектре ЭПР фосфора в сильнолегированном кремнии p-типа. ФТП, 1970, т. 4, в. 2, с. 325-328.
45. А.С. Алексеев, В.С. Багаев, Т.И. Галкина, О.В. Гоголин, Н.А. Пенин. Рекомбинационное излучение электронно-дырочных капель в легированном германии. ФТТ, 1970, т. 12, в. 12, с. 3516-3529.
46. А.С. Алексеев, В.С. Багаев, Т.И. Галкина, О.В. Гоголин, Н.А. Пенин, А.Н. Семенов, В.Б. Стопачинский. Излучение взаимодействующих экситонов в Ge в сильных магнитных полях. Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 12, в. 2, с. 203-205.
47. Б.Г. Журкин, В.И. Новиков, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин. Резонатор для исследования в полупроводниках при одноосном сжатии. ПТЭ, 1970, в. 2, с. 166.
48. Т.А. Бондаренко, Т.И. Галкина, Н.А. Пенин. Излучательный захват электронов отрицательно заряженными ионами ртути в германии. ФТТ, 1971, т. 13, в. 6, с. 1838-840.
49. П.С. Гладков, В.Б. Гиноман, Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Фотодиэлектрический эффект в компенсированном кремнии p-типа. ФТП, 1971, т. 5, в. 11, с. 2219-2221.
50. П.С. Гладков, В.Б. Гиноман, Б.Г. Журкин, В.Г. Михалевич, Н.А. Пенин, Г.П. Шипуло. Циклотронный резонанс в чистом германии при большой оптической накачке. Краткие сообщения по физике, 1971, в. 12, с. 17-23.
51. Н.А. Пенин, Н.Ш. Хайкин, Б.В. Юрист. К исследованию шум-фактора оптического гетеродинамического приемника с примесным фотосопротивлением. РЭ, 1972, т. 17, в. 5, с. 1018-1023.

52. В.С. Багаев, Т.И. Галкина, Н.А. Пенин, В.Б. Стопачинский, М.Н. Чураева. Осцилляции излучения электронно-дырочной ферми-жидкости в германии в сильных магнитных полях. Письма в ЖЭТФ, 1972, т. 16, в. 3, с. 120-124.
53. П.С. Гладков, Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин. Высокочастотная фотопроводимость и рекомбинационное излучение чистого германия при высокой интенсивности оптического возбуждения при низких температурах. ФТП, 1972, т. 6, в. 10, с. 1919-1023.
54. Н.А. Пенин, А.П. Болтаев, В.А. Курбатов, Н.Н. Соловьев. Измерение слабой модуляции излучения с помощью фотосопротивления. ФТП, 1972, т. 6, в. 7, с. 1391-1394.
55. П.С. Гладков, В.Б. Гинодман, Б.Г. Журкин, Н.А. Пенин, А.Б. Фрадков. Прибор для исследования фотодиэлектрического эффекта в полупроводниках. ПТЭ, 1972, в. 1, с. 903-908.
56. В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Свойства фотосопротивления из германия, легированного цинком и сурьмой, в гетеродинном режиме детектирования. ФТП, 1972, т. 6, в. 5, с. 903-908.
57. Н.Н. Сибельдин, В.С. Багаев, В.А. Цветков, Н.А. Пенин. Исследование конденсации экситонов в германии методом рассеяния света. ФТТ, 1973, т. 15, в. 1, с. 177-179.
58. В.С. Багаев, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков. Влияние температуры на условия конденсации экситонов в германии. ФТТ, 1973, т. 15, в. 11, с. 3269-3272.
59. Т.И. Галкина, В.А. Миляев, Г.Н. Михайлова, Н.А. Пенин. Излучение электронно-дырочных капель в германии при температуре 0,5 К. Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 18, в. 2, с. 99-102.
60. А.С. Алексеев, В.С. Багаев, Т.И. Галкина, О.В. Гоголин, Н.А. Пенин, А.Н. Семенов, В.Б. Стопачинский. Излучение свободных и взаимодействующих экситонов в сильных магнитных полях. Труды ФИАН, 1973, т. 67, с. 109-115.
61. А.П. Болтаев, В.А. Курбатов, Н.Н. Соловьев, Н.А. Пенин. Высокочастотная модуляция 10-микронного излучения с помощью эффекта нагревания носителей электрическим полем в германии р-типа. ФТП, 1973, т. 7, в. 10, с. 1896-1900.
62. А.С. Алексеев, Т.И. Галкина, Н.А. Пенин. Поляризация низкотемпературной фотолюминесценции германия, индуцированная деформацией. Письма в ЖЭТФ, 1974, т. 19, в. 7, с. 436-439.
63. В.С. Багаев, Н.В. Замковец, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков. Установка для исследования рассеяния света на электронно-дырочных каплях в германии. ПТЭ, 1974, в. 2, с. 242-244.
64. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Обнаружительная способность фотоприемника из германия, легированного цинком и сурьмой при температуре жидкого азота. ФТП, 1975, т. 9, в. 2, с. 292-296.
65. Л.А. Власенко, С.Н. Максимовский, Н.А. Пенин. Полупроводниковый материал. Авторское свидетельство, 1975, № 96171.
66. А.П. Болтаев, Н.А. Пенин. Разогревание носителей заряда в германии р-типа слабым электрическим полем. ФТП, 1976, т. 10, в. 5, с. 911-917.
67. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Определение дрейфовой подвижности по измерениям шума фотосопротивлений. ФТП, 1976, т. 10, в. 5, с. 1008-1010.
68. В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Модуляционный метод измерения гетеродинных характеристик фотоприемников. Квантовая электроника, 1976, т. 3, в. 9, с. 1909-1913.
69. А.Д. Бритов, Н.А. Пенин, С.Н. Максимовский, С.М. Караваев, И.П. Ревокатова, А.Л. Курбатов, И.С. Аверьянов, Б.П. Пырегов, В.А. Мызина. Перестраиваемый гетеролазер на PbSnSe-PbSe. Квант. Электрон., 1976, т. 3, в. 11, с. 2513-2515.

70. А.П. Болтаев, Н.А. Пенин. Влияние междырочных столкновений на разогревание носителей заряда в германии р-типа слабым электрическим полем. ФТП, 1977, т. 11, в. 11, с. 2246-2248.
71. В.А. Курбатов, Н.А. Пенин, Н.Н. Соловьев. Примесный фотоэффект в р-п-переходе из германия. ФТП, 1978, т. 12, в. 9, с. 1856-1858.
72. В.А. Курбатов, Н.А. Пенин, Н.Н. Соловьев. Фототранзистор. Авт. Свидетельство. 1978, № 638192.
73. А.П. Болтаев, Н.А. Пенин. Влияние междырочных столкновений на подвижность носителей заряда в германии р-типа. ФТП, 1979, т. 13, в. 3, с. 612-614.
74. А.П. Болтаев, Н.А. Пенин. Влияние одноосного сжатия на разогревание носителей заряда в германии р-типа слабым электрическим полем. ФТП, 1979, т. 13, в. 5, с. 965-968.
75. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Фазовый метод определения времени жизни неравновесных носителей заряда в фотопроводниках. Квант. Электрон., 1979, т. 6, в. 10, с. 2209-2214.
76. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Токовая фоточувствительность и время жизни неравновесных дырок в германии с примесью цинка. ФТП, 1979, т. 13, в. 9, с. 1771-1774.
77. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Ю.В. Настаушев, Н.А. Пенин. Фотопроводимость примесного германия (Ge:Zn:Sb, Ge:Hg:Sb) вблизи комнатной температуре. ФТП, 1979, т. 13, в. 10, с. 1918-1922.
78. Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Влияние случайного поля на энергию активации второго уровня цинка в германии. ФТП, 1981, т. 15, в. 8, с. 1486-1493.
79. С.Н. Максимовский, Э.Л. Нолле, Н.Н. Лойко, А.Э. Петров, Н.А. Пенин, А.Г. Турьянский. Зависимость концентрации углерода на поверхности эпитаксиальных пленок GaAs от величины разориентации подложки относительно кристаллографической плоскости. ФТП, 1982, т. 24, в. 9, с. 2596-2598.
80. Н.А. Пенин. О длине экранирования в примесном полупроводнике. ФТП, 1983, т. 17, в. 3, с. 431-436.
81. М.Г. Галкин, Н.А. Пенин, Н.Н. Соловьев. Спектр возбужденных состояний однократно заряженного иона цинка в германии. ФТП, 1983, т. 17, в. 4, с. 740-742.
82. Г.А. Асланов, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Зависимость времени жизни неравновесных дырок в р-германии от концентрации центров рекомбинации – ионов Zn и температуры. ФТП, 1983, т. 17, в. 4, с. 674-678.
83. В.А. Курбатов, Н.А. Пенин, Н.Н. Соловьев. Определение степени компенсации в примесном полупроводнике по измерениям оптического поглощения. ФТП, 1984, т. 18, в. 2, с. 285-288.
84. Г.А. Асланов, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Сечение захвата дырок ионами Hg в германии. ФТП, 1984, т. 18, в. 2, с. 319-323.
85. М.Г. Галкин, Н.А. Пенин, Н.Н. Соловьев. Влияние электрон-фононного взаимодействия на ширину линий спектра возбужденных состояний иона Zn в германии. ФТП, 1985, т. 19, в. 3, с. 512-516.
86. Н.А. Пенин, В.А. Курбатов, Н.Н. Соловьев. Температурная зависимость амплитудно-частотных характеристик фотопроводимости в полупроводнике с двухуровневой примесью (Ge:Hg). ФТП, 1985, т. 19, в. 6, с. 1008-1011.
87. Г.А. Асланов, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Кинетика фотопроводимости германия, легированного цинком, при малых временах фотоответа. ФТП, 1985, т. 19, в. 10, с. 1736-1740.

88. Н.А. Пенин. О распределении примесных атомов в барьере Шоттки или в барьере р-п-перехода в случае линейной зависимости барьерной емкости от напряжения. Краткие сообщения по физике, 1986, в. 9, с. 23-25.
89. М.Г. Галкин, В.А. Курбатов, Н.Н. Соловьев, Н.А. Пенин. Резонансная структура в непрерывной полосе фотоионизации иона Zn в германии. Краткие сообщения по физике, 1988, в. 3, с. 23-24.
90. Н.А. Пенин. Умножение фотовозбужденных носителей заряда при ударной ионизации примесных атомов в полупроводниках. ФТП, 1989, т. 23, в. 3, с. 466-470.
91. Н.А. Пенин. Оптическая и тепловая стимуляция примесной фотопроводимости при оптическом возбуждении примесных атомов в полупроводниках. ФТП, 1991, т. 25, № 11, с. 1941-1945.
92. Г.А. Асланов, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Нелинейность фотопроводимости германия с примесями ртути, кобальта и цинка при возбуждении излучением с $\lambda = 10.6$ мкм. ФТП, 1993, т. 27, № 2, с. 277-284.
93. А.П. Болтаев, Т.М. Бурбаев, Г.А. Калюжная, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Эффект отрицательной емкости в гетероструктурах Ni-TiO₂-pS. ФТП, 1994, т. 28, № 9, с. 1569-1575.
94. Г.А. Асланов, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Н.А. Пенин. Примесный фоторезистор в режиме импульсного оптического гетеродинамирования. ФТП, 1995, т. 29, № 1, с. 9-18.
95. Н.А. Пенин, А.И. Головашкин, Г.М. Гуро. Инерция электронов в сверхпроводящем кольце при неравномерном вращении. ФТТ, 1996, т. 38, № 5, с. 1493-1499.
96. Н.А. Пенин. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах. ФТП, 1996, т. 30, № 4, с. 626-634.
97. Т.М. Бурбаев, Г.А. Калюжная, В.А. Курбатов, В.С. Ноздрин, Н.А. Пенин. Экранирование переменного магнитного поля пленками и монокристаллами высокотемпературных сверхпроводников. ФТТ, 1997, т. 39, № 2, с. 228-230.
98. Т.М. Бурбаев, С.И. Красносвободцев, В.А. Курбатов, Н.П. Малакшинов, В.С. Ноздрин, Н.А. Пенин. Использование эффекта экранирования магнитного поля пленками ВТСП для коммутации СВЧ-сигналов. Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 13, с. 76-81.
99. А.П. Болтаев, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, М.М. Рзаев, Н.А. Пенин, Н.Н. Сибельдин. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетероструктурах на основе кремния. Известия АН, сер. Физическая, 1999, т. 63, № 2, с. 312-316.
100. Н.А. Пенин. Фотоемкостный эффект в монополярном металл-диэлектрик полупроводник конденсаторе при низких температурах. ФТП, 2000, т. 34, № 5, с. 562-566.
101. Н.А. Пенин. Фотоемкостный эффект в монополярном МДП конденсаторе с полупроводниковым электродом, легированным двумя акцепторными примесями, при низких температурах. ФТП, 2001, т. 35, № 10, с. 1208-1213.
102. Н.А. Пенин. Как начиналась германиево-кремневая электроника в нашей стране. Радиопромышленность, 2003, в. 4, с. 73-75.
103. Н.А. Пенин. Время жизни основных носителей заряда в области потенциального барьера монополярного МДП конденсатора. Микроэлектроника, 2004, т. 33, № 3, с. 191-197.
104. А.П. Болтаев, Н.А. Пенин, А.О. Погосов. Активационная проводимость в островковых металлических пленках. ЖЭТФ, 2004, т. 126, № 4(10), с. 954-961.

Редактор – И.Н. Черткова

Компьютерная вёрстка – Т.Вал. Алексеева

Сдано в набор 15.06.07 г. Подписано в печать 23.10.07 г.
Формат бумаги 70х100/16. Гарнитура PetersburgС. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 2.8. П. л. 3.125. Тираж 300 экз.
