

**В Е С Т Н И К
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 285

Январь

2005

Серия «Физика»

Свидетельства о регистрации: бумажный вариант № 018694, электронный вариант № 018693
выданы Госкомпечати РФ 14 апреля 1999 г.

ISSN: печатный вариант – 1561-7793; электронный вариант – 1561-803X
от 20 апреля 1999 г. Международного Центра ISSN (Париж)

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
посвященный 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений
по физике полупроводников**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 2

**ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЙ**

Вяткин А.П., Кривов М.А., Лаврентьева Л.Г. История организации и становления научного направления по физике полупроводников в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте	3
Романова И.Д. Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов 40 лет.....	13
Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаксии полупроводников в СФТИ.....	17
Воеводин В.Г. Лаборатория полупроводникового материаловедения СФТИ.....	24
Хлудков С.С. Становление и развитие лаборатории физики полупроводников.....	28
Вяткин А.П., Вилисов А.А. Развитие физико-технологических основ создания полупроводниковых приборов	33
Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Высокочувствительные приемники оптического излучения	39
Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты электронного материаловедения.....	43
Войцеховский А.В., Гаман В.И., Гермогенов В.П., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г., Мокроусов Г.М. Подготовка специалистов в области физики и техники полупроводников в Томском госуниверситете.....	47

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ (ОБЗОРЫ)

Караваев Г.Ф., Гриняев С.Н., Чернышов В.Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах.....	53
Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. Исследование тройных полупроводников $A^2B^4C_2^5$	63
Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитаксия арсенида галлия	74
Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы	84
Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках.....	95
Гермогенов В.П. От сплавных контактов к эпитаксиальным гетероструктурам.....	103
Гаман В.И. Электронные процессы в полупроводниковых диодах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник.....	112
Вяткин А.П., Максимова Н.К., Филонов Н.Г. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на GaAs	121
Божков В.Г., Лукаш В.С. Полупроводниковые СВЧ-приборы	129
Криворотов Н.П., Изаак Т.И., Ромась Л.М., Свинолулов Ю.Г., Щеголь С.С. Микроэлектронные сенсоры давления	139
Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды	148
Толбанов О.П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия.....	155
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Фотоэлектрические инфракрасные детекторы с управляемой спектральной характеристикой	164

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 172

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ..... 174

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ ИНСТИТУТУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ 40 ЛЕТ

В январе 1964 г. по решению Совета министров СССР в городе Томске был открыт Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов. Предпосылками создания НИИПП в Томске явились имеющаяся школа специалистов по материаловедению на кафедрах Томского государственного университета и в лабораториях Сибирского физико-технического института, новые оригинальные результаты научно-исследовательских работ по выращиванию и изучению свойств полупроводниковых материалов типа A^3B^5 , полученные под руководством профессора ТГУ В.А. Преснова, наличие в Томске высокопрофессиональных кадров и возможности подготовки молодых специалистов-физиков по полупроводниковой электронике и материаловедению полупроводников. В.А. Преснов был назначен директором НИИПП. На работу в НИИПП перешел ряд сотрудников ТГУ и СФТИ, ведущих специалистов в области физики и химии полупроводников: В.В. Дьяков (гл. инженер НИИПП), В.И. Домнин (зам. гл. инженера), начальники отделов НИИПП Л.Л. Люзе, С.С. Хлудков, Б.С. Азиков, начальники лабораторий: Ю.К. Пантелеев, Б.Г. Захаров, С.В. Машнин, В.М. Викулин, В.Г. Божков, И.К. Ковалев, Г.Ф. Караваев, Е.К. Брыснев, И.И. Отмахов, Л.Н. Возилова. Начальником отдела полупроводниковых материалов стал В.А. Ермолаев из ТПИ.

Перед НИИПП были поставлены задачи разработки технологии выращивания арсенида галлия, изучения его свойств и создания новых классов приборов на его основе.

Фундаментальные исследования процессов роста монокристаллов и эпитаксиальных структур GaAs проводились в СФТИ А.П. Изергиным и Л.Г. Лаврентьевой. Совместные работы НИИПП и СФТИ в этой области позволили создать на предприятии собственную материаловедческую базу и воспитать ряд высококлассных специалистов в области материаловедения, таких, как Л.П. Пороховниченко, В.Д. Дедков, Н.Н. Бакин, И.Ш. Ахунов, Н.А. Чернов и другие. При их непосредственном участии в НИИПП были разработаны процессы получения эпитаксиальных структур широкой номенклатуры для СВЧ-изделий (диодов Ганна, смесительных, умножительных, детекторных, импульсных диодов и др.), оптоэлектронных приборов ИК-диапазона, интегральных схем. Большинство изделий, которые выпускались и выпускаются сегодня на заводе НИИПП, обеспечивались эпитаксиальными структурами, созданными в отделе материаловедения. Технология получения эпитаксиальных структур арсенида галлия методом жидкофазовой эпитаксии, созданная под руководством В.П. Орлова, была внедрена на серийном заводе чистых металлов в городе Светловодске.

Серия измерительных установок для контроля параметров полупроводниковых материалов, разработанная под руководством В.Г. Кустова, была аттестована и передана на ряд заводов СССР, выпускающих

полупроводниковые материалы. На основании исследований, проведенных в НИИПП, по корреляции между условиями получения материала, его электрофизическими свойствами и параметрами приборов были сформулированы требования к разработке полупроводниковых материалов и структур для других материаловедческих НИИ отрасли. Результатом совместной работы НИИПП и НИИ «Элма» (г. Зеленоград), ВНИИ МЭТ (г.Калуга) явился выпуск отраслевых технических условий на эпитаксиальные структуры для СВЧ и оптоэлектронных изделий. Начиная с 2000 г. в НИИПП интенсивно ведутся работы по выращиванию материалов для детекторов ядерного излучения, специализированных структур для варикапов, высокоэффективных ИК-излучателей, гетероструктур на основе соединений A^3B^5 для фотоэлектрических преобразователей.

Разработка приборов на арсениде галлия тоже начиналась совместно с СФТИ. Изучением точечного контакта металл – арсенид галлия занимался в СФТИ А.А. Вилисов (ныне начальник лаборатории НИИПП). Результаты его исследований легли в основу первой совместной с НИИ «Сапфир» г. Москвы опытно-конструкторской работы по созданию точечного параметрического диода «Купол». Первым серийным прибором, разработанным в НИИПП и имевшим большой спрос, был быстродействующий импульсный диод АД561, главным конструктором которого была И.Д. Романова – выпускница радиофизического факультета ТГУ. В лаборатории под ее руководством позднее был разработан ряд быстродействующих импульсных диодов с барьером Шоттки на эпитаксиальном арсениде галлия. Использование этих приборов в радиотехнической промышленности позволило создать первые в СССР образцы стробоскопических осциллографов с полосой пропускания в ГГц-диапазоне.



И.Д. Романова

В конце 1966 г. стало ясно, что для удовлетворения резко возрастающей потребности радиотехнической промышленности в новых изделиях электронной техники необходима организация их серийного выпуска. В 1967 г. при НИИПП создается сначала опытный, а позднее серийный завод по выпуску полупроводниковых приборов, разрабатываемых в подразделениях института. Большой вклад в дело становления и развития завода внесли его директора В.М. Каменский и В.М. Тевелевич, главные инженеры В.В. Дьяков, В.С. Волженин, Ю.К. Пантелеев, начальники производства А.В. Давыдов, В.Н. Дирин, В.П. Клюс, главные технологи Р.К. Заятинов, Б.П. Елфимов, В.В. Дохтуров. Ю.К. Пантелеев позже стал директором НИИПП и руководил предприятием более 20 лет.

Одним из главных научно-технических направлений НИИПП было и остается направление создания СВЧ-приборов, таких, как смесительные, детекторные, настроенные диоды с барьером Шоттки миллиметрового диапазона, монолитные интегральные схемы. Научным руководителем и главным конструктором этого направления является выпускник ТГУ и ученик В.А. Преснова, доктор технических наук, профессор В.Г. Божков.

В настоящее время микроволновые методы исследований применяются практически во всех областях фундаментальной и прикладной науки. Решение задач освоения диапазона миллиметровых длин волн, повышения выходной мощности генераторов и усилителей, миниатюризации устройств, интегрирования элементов с переходом к объемным монолитным схемам стало основным направлением деятельности В.Г. Божкова и руководимого им отдела СВЧ-электроники. Разработанная в этом отделе серия отечественных арсенидогаллиевых смесительно-детекторных диодов миллиметрового диапазона (от 8 до 2 мм) в малогабаритных металлокерамических корпусах по своим параметрам и в настоящее время соответствует лучшим мировым аналогам.

Смесительно-детекторные диоды для гибридно-интегральных схем (ГИС) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн – это первые отечественные арсенидогаллиевые диоды с балочными выводами (главный конструктор Т.М. Табакаева). Эти диоды стали основой для последующего создания широкого спектра монолитных интегральных схем (МИС) миллиметрового диапазона. Соответствующий аналог за рубежом появился уже после завершения ОКР в НИИПП.

Смесительно-детекторные диодные пары типа 3А143АС с балочными выводами (30 – 300 ГГц) в течение длительного времени не имели аналогов в диапазоне выше 100 ГГц.

Первые и единственные преобразовательные диоды на основе фосфида индия (4А142А-5) с пониженной высотой барьера и наиболее высокочастотные отечественные диоды (3А142А-5, предельная частота 4500 ГГц) были разработаны главным конструктором О.Ю. Малаховским. В последние годы созданы кремниевые и арсенидогаллиевые варикапы и арсенидогаллиевые варикапные матрицы, предназначенные для применения в частотно избирательных схемах деци-

метрового, метрового, декаметрового и гектометрового диапазонов длин волн.

Созданию диодов Ганна (ДГ) на основе GaAs предшествовали теоретические и физические исследования в отделе НИИПП, которым руководил д.т.н. Л.Л. Люзе. Разработка и промышленное освоение ДГ активно развивались в период с 1970 по 1990 гг. Была создана программа развития ДГ на 20 лет с перспективой достижения мощности 100 мВт на частоте 100 ГГц. Достижения в области создания ДГ были весьма впечатляющими. На предприятии были созданы ДГ с рекордными параметрами – мощностью 1 Вт в 3-сантиметровом диапазоне и 250 мВт в 8-миллиметровом диапазоне длин волн, в производстве освоено 54 типоминимала ДГ с общим объемом выпуска 55 тысяч штук для 60 предприятий страны.

Первые в стране промышленные ДГ 3А703 и 3А705 были разработаны Л.Г. Шаповалом и А.А. Красильниковым. Диоды Ганна миллиметрового диапазона разрабатывались в лаборатории В.С. Лукаша. В 90-х гг. завершаются разработки дискретных ДГ и начинается создание твердотельных генераторных ДГ (ГДГ) и схем на их основе. Под руководством Б.А. Наливайко были выполнены работы по изготовлению СВЧ-модулей.

С начала 1970-х гг. в НИИПП начало развиваться научно-техническое направление по созданию приборов на основе GaAs, содержащего глубокие примесные центры. Научным руководителем этого направления был С.С. Хлудков, главным конструктором Г.Л. Приходько. В результате нетрадиционного подхода к созданию приборных структур были разработаны GaAs переключающие лавинные S-диоды (АА732, АА742, 3А801, АД530), по совокупности всех параметров превосходящие приборы данного класса.

Новым для предприятия в начале 90-х гг. стал переход к разработке интегральных аналоговых и цифровых схем на GaAs. По инициативе и при непосредственной поддержке директора НИИПП Ю.К. Пантелеева был создан отдел интегральных схем (начальник отдела И.Д. Романова). Впервые в стране были начаты разработки ряда проблемно ориентированных интегральных схем (ИС) на арсениде галлия для измерительных систем анализа однократных скоростных процессов. Были созданы ИС устройства выборки и хранения, компараторов, регистров сдвига, ячеек памяти и схем управления, операционного усилителя для ЦАП. Главными схемотехниками этой измерительной системы в целом и всех ИС, входящих в ее состав, были В.С. Липин и В.Н. Донцов, основными разработчиками технологических принципов создания ИС – Г.И. Айзенштат, М.Г. Игнатъев, В.Д. Тюменцев. И сегодня в СКТБМ под руководством А.В. Хана ведутся не только разработки ИС и ГИС на арсениде галлия, но создается целый ряд модулей для нужд авионики. Это балансные модуляторы, делители с переменным коэффициентом деления, цифро-аналоговые преобразователи, генераторы, управляемые напряжением, цифровые вычислительные синтезаторы частоты. Главным специалистом этого направления является А.В. Голиков.

С момента организации НИИПП и по настоящее время одним из основных направлений в тематике

предприятия является оптоэлектроника. Наиболее крупным достижением раннего периода в развитии светоизлучающих диодов (СИД) было создание ИК-диодов АЛ106 и АЛ107 (главный конструктор Ю.К. Пантелеев). Было разработано и запущено в серийное производство оборудование для шлифовки и полировки кристалла каждого диода в форме сферы Вейерштрасса. Именно благодаря этой технологии и сегодня излучающий диод ЗЛ107 имеет рекордные в своём классе приборов параметры и пользуется самым большим спросом. В этой разработке и в большинстве последующих тем очень ярко проявился конструкторский талант начальника отдела корпусов А.В. Лавренкова.

Создание технологии излучающего диода ЗЛ107 (особенно в части изготовления кристалла с полусферой) оставило глубокий след в дальнейших разработках, проведенных под руководством к.ф.-м.н. Е.В. Олексива. Базовая конструкция диода и технология его изготовления послужили основой для создания высокоскоростного светодиода АЛ115, серии мощных излучающих ИК-диодов ЗЛ119 и ЗЛ123 (главный конструктор А.С. Вишняков). На базе этой технологии далее был создан супермощный излучающий диод ЗЛ130 (главный конструктор Г.Н. Захарова). Оптоэлектронные приборы, созданные в НИИПП, нашли широкое применение в аппаратуре космического назначения. Аппараты, в которых применялись изделия оптоэлектроники, побывали в космосе, на Венере и Луне.

С 1981 г. работы по излучающим диодам (ИД) возглавил главный конструктор направления А.А. Вилисов. Значительную часть тематики составляли НИОКР по созданию ИД для ВОЛС. Были разработаны и освоены серийным производством ИД ЗЛ124, ЗЛ135, ЗЛ132, ЗЛ141 с длинами волн 0,87, 1,30 и 1,55 мкм. Таким образом, в обеспечение отечественных разработок ВОЛС были освоены все «окна прозрачности» кварцевого световодного волокна.

В развитии работ по созданию активных элементов для ВОЛС существенную роль сыграла разработка оптопреобразователя ЗОД148 (главный конструктор И.В. Соснина), на основе которого были созданы внутриобъектовые системы связи для полудуплексного режима работы. Это уже интегральное устройство – монокристалл, содержащий в себе излучающий и приёмный элементы.

В плане интегральных устройств на предприятии был создан один из первых в стране оптрон ЗОД107 (главный конструктор Б.А. Ничипуренко, в дальнейшем длительное время возглавлявший отдел оптоэлектроники). Этот оптрон был освоен в производстве в 1979 г. с использованием кремниевого фотодиода с полным внутренним отражением (разработка СФТИ, руководитель А.А. Вилисов). Благодаря комплексу использованных технических решений, этот оптрон до сих пор не превзойдён по совокупности передаточных характеристик.

Другое важнейшее направление, развивающееся и в настоящее время, – создание мощных ИК-излучающих диодов. Был разработан диод ЗЛ148, мощность излучения которого достигает 30 Вт в импульсном режиме. На его основе разработана серия других

мощных диодов, которые нашли достаточно широкое применение в технике.

Наряду с разработкой специализированных излучающих диодов на предприятии создавались индикаторные светодиоды различного цвета свечения (главный конструктор Е.В. Олексив). Это направление в дальнейшем развилось в работы по созданию монолитных модулей экрана.

В процессе конверсии 90-х гг. были начаты работы по двойному применению мощных светоизлучающих диодов.

Разработаны и внедрены в серийное производство светодиодные физиотерапевтические аппараты серии «Геска», разработаны аппараты для внутрисполостной магнитосветотерапии «Виза». Они обладают высокой лечебной эффективностью, а по функциональным свойствам и ценовому уровню доступны широким слоям населения, что обеспечивает высокую социальную значимость этой работы.

Новым направлением, которое развивается на предприятии в настоящее время, является разработка квантово-чувствительных детекторов высокоэнергетических частиц и рентгеновской аппаратуры на их основе. Руководит работой начальник лаборатории СФТИ, доктор наук О.П. Толбанов, ведущий специалист к.ф.-м.н. Г.И. Айзенштат.

Параллельно с разработками полупроводниковых изделий коллективом конструкторов велись разработки оборудования для измерения параметров полупроводниковых структур, характеристик приборов, испытательного, технологического и измерительного оборудования, оснастки и приспособлений (А.В. Лавренков, А.Ф. Кутелёв, Ю.Е. Кайгародов, А.В. Козлова и другие).

Проблемы освоения разработанных изделий в серийном производстве, модернизации изделий, выпускаемых на заводе, обеспечения конкурентно и патентоспособности, наиболее экономичной технологии производства – это задачи, которые успешно решались коллективом, которым руководил главный конструктор предприятия Г.Ф. Ковтуненко.

С целью унификации технологических процессов и их усовершенствования в 1975 гг. был создан технологический отдел, где были сосредоточены лучшие специалисты-технологи. Комплекс технологических процессов производства полупроводниковых приборов: химическая и плазмо-химическая обработка полупроводников, различные методы нанесения на полупроводник металлов и диэлектриков, ионная имплантация примесей, процессы фотолитографии – разрабатывались творческими коллективами под руководством известных специалистов: Л.Н. Возмиловой, А.П. Мамонтова, В.Ф. Саврасова, Л.П. Громовой, С.Г. Канаева. Разработки керамических, кварцевых и других корпусов, оснастки для их изготовления, методов и режимов герметизации велись под руководством Е.К. Брыснева, А.В. Лавренкова и др.

Предприятие с самого начала работало на принципе «самодостаточности», то есть проводился полный комплекс работ в обеспечение серийного производства приборов – от создания необходимого полупроводникового материала до разработки всего комплекса нормативно-технической документации.

Большой вклад в дело продвижения изделий предприятия на отечественный и зарубежный рынок внес отдел маркетинговых исследований, создателем и руководителем которого был А.М. Кречмер. Необходимо отметить также и плодотворную работу отдела научно-технической информации, лаборатории патентных исследований.

Начавшиеся в стране в 90-е гг. рыночные преобразования поставили перед предприятием проблемы, от решения которых зависела дальнейшая судьба коллектива и предприятия в целом. Эти проблемы пришлось решать Э.Ф. Яуку, который стал директором предприятия в 1994 г. Перед сотрудниками предприятия были поставлены новые задачи – определение эффективных направлений разработок изделий, пользующихся спросом на рынке, создание новых организационных структур, поиск своей ниши в рыночных условиях. Был создан ряд комплексов, объединяющих разработку, производство и реализацию изделий: материаловедческий комплекс (Н.Н. Бакин), СВЧ-комплекс (О.Ю. Малаховский), отдел СВЧ-электроники (В.Г. Божков), СКТБ «Микроэлектроника» по разработке интегральных схем на арсениде галлия и комплексированных устройств с их применением (А.В. Хан), подразделение медицинской техники (Б.А. Наливайко). Вспомогательные службы занялись выпуском и реализацией своей продукции и оказанием различного вида услуг населению и предприятиям города и области.

Сегодня коллектив НИИПП работает по следующим основным научно-техническим направлениям:

- материалы для микро- и нанoeлектроники;

- элементная база для СВЧ-электроники и радиотехники;
- оптоэлектроника и полупроводниковая светотехника;
- оптическая и СВЧ-связь.

Важнейшими задачами являются:

- разработка и производство СВЧ-приемо-передающих модулей, изделий оптоэлектроники, светотехники, солнечной энергетики;
- создание современной технологической базы для производства материалов, обновление технологического оборудования для исследований и выпуска разрабатываемых в НИИПП изделий.

В год 400-летия города Томска НИИ полупроводниковых приборов отметил своё 40-летие.

Сегодня ОАО «НИИПП» – это уникальный научно-производственный комплекс России, в котором сочетаются научно-исследовательские работы по выращиванию сложных полупроводниковых структур с работами по созданию на их основе изделий электронной техники и радиотехники. Причем это разработки не только новой элементной базы, но и сложных функционально законченных узлов и модулей для авионики и спецтехники.

НИИПП принимал активное участие в проведении всесоюзных совещаний по арсениду галлия в Томске, а также организовывал и проводил специальные научные мероприятия по своей тематике. Был выпущен ряд специализированных номеров научных журналов и научно-технических сборников, в которых представлены обзоры, отражающие тематику института и наиболее важные достижения коллектива [1 – 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды НИИПП. Вып. 1. Ч. 1, 2. Томск, 1972.
2. Труды НИИПП. Вып. 2. Томск, 1972.
3. Труды НИИПП. Вып. 3. Ч. 1 – 3. Томск, 1973.
4. Электронная промышленность. 1993. № 9 (выпуск посвящен 30-летию НИИПП).
5. Электронная промышленность. 1998. № 1 – 2 (выпуск посвящен 35-летию НИИПП).
6. Электронная промышленность. 2002. № 2 – 3.