

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Государственный образовательный стандарт дисциплины ОПД.Ф.02.02 «Электроника» направления подготовки студентов 654400 по специальностям: 200900 — Сети связи и системы коммутации; 201000 — Многоканальные телекоммуникационные системы; 220100 — Вычислительные машины, комплексы, системы и сети; 201200 — Средства связи с подвижными объектами, — включает в себя частично или полностью различные разделы электроники. В основном, Госстандартом дисциплины «Электроника», охвачены следующие разделы электроники: полупроводниковая электроника и микроэлектроника, физические основы которых приведены в Госстандарте дисциплины «Физические основы электроники».

В Госстандарт дисциплины «Физические основы электроники» не вошли разделы электроники: вакуумная и плазменная электроника; квантовая и оптическая электроника.

Учебное пособие написано по материалам лекций дисциплин «Электроника» и «Физические основы электроники», прочитанных авторами в разные годы в Московском техническом университете связи и информатики и Ростовской-на-Дону государственной академии сельскохозяйственного машиностроения. Авторы методически объединили материалы лекций указанных дисциплин, что органически представляло основы микроэлектроники и микропроцессорной техники, которые вошли в содержание настоящего учебного пособия «Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники». При этом основной акцент был сделан на технологических и схемотехнических основах построения и функционирования элементной базы приборов и устройств микроэлектроники и микропроцессорной техники, их математического синтеза. Авторы обязаны замечательным учебникам и учебным пособиям Щуки А. А., Степаненко И. П., Бойко В. И. и др., Герасимова В. Г. и др., Ефимова Е. И. и др., а также других замечательных отечественных ученых и преподавателей, методические находки которых были использованы в учебном процессе и процитированы в учебном пособии. Задачи и упражнения авторами адаптированы из популярных задачников Гольденберга Л. М., Левитского С. М., Линча П., Терехова В. А., Успенского А. В. и других крупных методистов.

Учебное пособие включает в себя три главы. В конце каждого раздела предлагаются задачи которые снабжены решениями. Эти классические, ранее апробированные задачи могут использоваться для проведения индивидуальных занятий, а также для самостоятельной работы студентов. Знакомясь с решением задач, студент может самообразовываться, самостоятельно разбираться в отдельных вопросах курса лекций. Также в конце каждого раздела учебного пособия приведены контрольные вопросы и рекомендуемая литература. Контрольные вопросы должны быть применены студентами для закрепления лекционного материала и могут также использоваться преподавателями при составлении экзаменационных билетов, а рекомендуемая литература — для углубленного изучения рассматриваемых и возникающих проблем и вопросов.

Работа по написанию учебного пособия была распределена между авторами следующим образом: введение, глава 1, написаны кандидатом технических наук доцентом Ю. А. Смирновым; предисловие, глава 2 — доктором технических наук профессором С. В. Соколовым; глава 3 — кандидатом технических наук доцентом Титовым Е. В. Компьютерный набор учебного пособия провел Ю. А. Смирнов, а общее редактирование — С. В. Соколов.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные критические замечания, сделанные ими при просмотре электронного варианта пособия.

Все замечания и пожелания по содержанию учебного пособия просим вас направлять на электронный адрес (e-mail): [smirnoff.iura@yandex.ru](mailto:smirnoff.iura@yandex.ru).

*Авторы*

# ВВЕДЕНИЕ

## ТРЕТЬЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ — РОЖДЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

**Б**урное развитие дискретной полупроводниковой техники, возможность автоматизации производства таких структур привели к идее интеграции, которая, в сущности, не нова. Еще до Второй мировой войны были попытки изготовления интегрального устройства, объединяющего резистор с конденсатором для катодной цепи электровакуумной лампы. Идея не была реализована потому, что выход годных резисторов и конденсаторов был слишком низким. Ситуация в корне изменилась при интеграции полупроводниковых приборов.

И тут уместно вспомнить любопытный факт. В начале 50-х годов, когда транзисторы были еще модной игрушкой в лабораториях ученых, а промышленная техника изготовлялась на электровакуумных лампах, инженер из Великобритании Дж. Даммер предложил изготавливать электронное оборудование в виде твердого блока из полупроводникового материала. В таком блоке отсутствуют соединительные провода, он включает в себя слои изолирующих, проводящих, усиливающих, выпрямляющих структур, которые в целом надежно выполняют заданные функции. Эта мысль звучала как анекдот даже в аудитории инженеров-электриков. Мало кого интересовали тогда транзисторы вообще, а проблема их надежности вовсе никого не волновала. Это выступление потонуло в море информационных сообщений. Его «раскопали», но не инженеры, а историки науки лишь через 25 лет(!). Идея интеграции в полупроводниковом производстве пришла с другой стороны — со стороны технологии в электронном материаловедении.

В 1959 году было предложено использовать транзисторные структуры, соединенные проводниками в пределах одной пластины. Такие транзисторы получили название *интегральных*, а кристаллы стали называть *интегральными схемами* (ИС). Заслуга изобретения интегральных схем принадлежит двум исследователям, каждый из которых сделал это независимо друг от друга. Причем оба ничего не знали об идее Даммера, даже не слышали о нем. Это были Джек Сент Клер Килби из фирмы Texas Instruments и Роберт Н. Нойс из фирмы Fairchild semiconductor.

Килби предлагал коммутировать дискретные полупроводниковые элементы тонкой золотой проволокой. С этой целью он изготовил резисторы, положив в основу омические свойства тела полупроводника, а в качестве конденсаторов использовал обратно смещенные  $p$ - $n$ -переходы, вырезанные из полупроводника. Из одной диффузионной области путем фотогравировки изготавливался мезатранзистор. Так была создана первая твердая схема.

При всем очевидном прогрессе эта схема не позволяла оптимизировать параметры элементов, выход годных составлял около 10%, неэкономичность производства и невозможность доработки схемы поставили вопрос об ее внедрении в производство.

В схеме Нойса была внедрена идея изоляции отдельных элементов с помощью обратного смещенных  $p$ - $n$ -переходов, а коммутация элементов осуществлялась через отверстия в окисле с помощью напыляемых металлических токоведущих дорожек.

Это изобретение в 2000 году было отмечено Нобелевской премией, которую получил Ж. Килби. К сожалению, Р. Нойс до этого дня не дожил.

С усложнением схем резко возросла стоимость межсоединений дискретных элементов. Нужно было решить две проблемы. Во-первых, разработать пассивные компоненты (резисторы и конденсаторы), а во-вторых, преодолеть ограничения, связанные с интеграцией, — оптимизировать параметры индивидуальных компонентов в схеме, преодолеть синдром невысокого процента выхода годных структур, получить возможность изменять функции дорогой и трудоемкой схемы.

Первая проблема решалась довольно просто, ключом к ее решению стала технология, с помощью которой удалось получить участки кремния с различной проводимостью и тем самым изготовить сопротивления в определенных областях транзисторной структуры. В основу конструирования микроэлектронной емкости были положены обратные смещенные  $p$ - $n$ -переходы транзисторных структур.

Что касается второй проблемы, то многие годы удавалось преодолевать ограничения, связанные с интеграцией. Удавалось до определенного времени, пока новые разработанные технологические процессы позволяли получать выход годных структур, близкий к 100%.

Прежде всего, фирме Fairchild удалось пассивировать поверхность кремния его же окислом. Там же был разработан процесс создания базы в коллекторе методом диффузии. Это позволило соединить все три области транзистора путем напыления на окисел токоведущих дорожек.

На фирме Bell Telephone Labs в 1960 году разработали *эпитаксиальный метод* наращивания слоев на монокристаллическом кремнии. Именно этот процесс позволил создавать транзисторные структуры с воспроизводимыми параметрами, повысить выход годных, снизить стоимость. Таким способом удалось на прочной толстой подложке создать транзисторы с тонкой базой. Открывалась возможность разработки высокочастотных транзисторов большой мощности.

Таким образом, наряду с дискретной полупроводниковой электроникой появилась *интегральная электроника (ИЭ)*. Этот термин отражает идею

интеграции элементов. Позже за этим направлением в электронике прочно закрепилось название *микроэлектроника*. Этот термин отражает идею микроминиатюризации.

Интегральные транзисторы стали основными изделиями микроэлектроники. Сначала успешно развивались биполярные транзисторы. Наряду с традиционными структурами для дискретной полупроводниковой электроники, в семействе интегральных транзисторов появились уникальные. Речь идет о многоэмиттерных и многоколлекторных транзисторах, транзисторах с барьером Шоттки и др. Именно с их помощью удалось создать эффективные схемные решения.

В последние годы проявился интерес к униполярным транзисторам. Технология их изготовления более простая. К этому типу относятся *n*-МОП и *p*-МОП транзисторы, имеющие структуру «металл — окисел — полупроводник». Особенно перспективны *комплементарные* или взаимодополняющие транзисторы (КМОП). В этих структурах используются одновременно два транзистора с каналами проводимости *p*- и *n*-типов, они отличаются высокой экономичностью и надежностью.

Однако на пути развития традиционных транзисторных структур стоят физические, технологические, экономические и другие ограничения. Примерно те же, о которых волновались еще в 60-е годы.

А что у нас в стране?

В 1962 году в НИИ-35 (НИИ «Пульсар») приступили к разработке первой серии интегральных кремниевых схем ТС-100. Руководителем разработки были Б. В. Малин (начальник отдела) и А. Ф. Трутко (директор института). Цикл планарной технологии включал более 300 операций, который был освоен самостоятельно с нулевого уровня. Были созданы опытный цех, научно-технологический отдел, ставший полигоном для обучения специалистов в области планарной технологии. Были сконструированы автоматизированные агрегаты пооперационной обработки кремниевых пластин, разработано специальное технологическое оборудование. Работа по серии ТС-100 длилась до 1965 года, а затем еще два года шло освоение заводского производства с военной приемкой.

Для ведущей мировой державы, какой был СССР, масштабы производства ИС были явно недостаточны.

8 августа 1962 года было подписано Постановление ЦК КПСС и СМ СССР о создании Научного центра микроэлектроники в подмосковном городе Крюкове. В соответствии с ним в состав центра вошли вновь созданные НИИ теоретических основ микроэлектроники, НИИ микросхемотехники, НИИ технологии микроэлектроники, НИИ машиностроения, НИИ специальных материалов и три опытных завода при этих институтах. Началось интенсивное строительство центра и города со сложной инфраструктурой, обслуживающей центр. Сегодня этот город носит название Зеленоград, ныне ставший районом Москвы и являющийся аналогом Кремниевой Долины (США).

Научный центр должен был охватывать все аспекты микроэлектроники, весь цикл «исследование — производство». Постановление было документом

де-юре. Де-факто все сложилось по-другому, более масштабно. И это только благодаря усилиям министра электронной промышленности А. И. Шокина.

В 1962 году был основан НИИ микроприборов (директор И. Н. Букреев) с опытным заводом «Компонент» и институт по разработке специального технологического оборудования — НИИ точного машиностроения (директор Е. Х. Иванов) с заводом электронного машиностроения «Элион».

В 1963 году был организован НИИ точной технологии (директор В. С. Сергеев), которому через некоторое время был придан завод «Ангстрем», НИИ материаловедения (директор А. Ю. Малинин) с заводом «Элма». Год спустя вошел в строй НИИ молекулярной электроники (и. о. директора И. А. Гурев) с заводом «Микрон». Одновременно было организовано Центральное бюро применения интегральных схем (ЦБПИМС). Поисковыми исследованиями должен был заниматься НИИ физических проблем (директор Ф. В. Лукин). Было решено готовить кадры на месте, в зоне Научного центра. В 1965 году был образован институт электронной техники (МИЭТ), которому был придан собственный опытный завод.

А пока кадры подрастали, целые коллективы воспитывались в Москве. Так коллектив будущего НИИ МЭ воспитывался в отделе Б. В. Малинина в НИИ «Пульсар». К этому времени в НИИ «Пульсар» было развито не только полупроводниковое производство, но и реально разрабатывались первые ИС. В 1965 году НИИ МЭ возглавил К. А. Валиев, ныне академик, директор физико-технологического института РАН. На основе технологии, близкой к технологии производства планарных транзисторов «Плоскость», коллективом НИИ МЭ под руководством К. А. Валиева уже в 1966 году были разработаны ИС типов «Иртыш», «Микроватт», «Логика», диодно-транзисторные логические схемы. К концу года их было выпущено около 100 тыс. шт.

Структура предприятий Научного центра менялась в соответствии с задачами промышленности. Со временем на базе НИИ микроприборов и завода «Компонент» было создано научно-производственное объединение «Элас», тесно связанное с космической отраслью. С момента зарождения квантовой электроники возникли предприятия этого профиля: НПО «Зенит», КБ высокоинтенсивных источников света с заводом «Фотон».

Параллельно с развитием Научного центра в Зеленограде полупроводниковое и микроэлектронное производство развивалось в подмосковном Томилино и Воронеже на заводах полупроводниковых приборов, в Ленинграде на НПО «Светлана», в Минске на заводе полупроводниковых приборов (впоследствии НПО «Интеграл»), в Вильнюсе в НИИ «Вента», в Кишиневе на заводе «Мезон», в Тбилиси в НИИ «Мион», в Баку на заводе «Азон», а также в Риге, Новосибирске, Павловском Посаде, Фрязино. Это позволило уже к 1970 году выпустить 3,6 млн ИС 69-й серии.

В США также вырастали новые фирмы. Только в Кремниевой долине в 1966–1967 годах были созданы три новые фирмы, в 1968 — тринадцать, в 1969 — восемь. Росла номенклатура микроэлектронных приборов и интегральных схем на основе использования различных технологических процес-

сов. Появились запоминающие устройства (ЗУ) с произвольной выборкой, перепрограммируемые ЗУ, разработаны ИС с инжекционной и эмиттерно-связанной логикой, приборы с зарядовой связью, комплементарные МОП-приборы. Микроэлектронная технология позволяла создать ЗУ на цилиндрических магнитных доменах.

В 70-х годах прошлого века ежегодный объем продаж полупроводниковых приборов и ИС превысил 6 млрд долларов.

Началась эра сверхбольших интегральных схем (СБИС).

В 1973 году появились первые микропроцессоры, представляющие собой интегральные схемы с функциями вычислительных устройств. Начался новый виток развития микроэлектроники. В США фирма Intel захватила мировое лидерство, которое удерживает до сегодняшнего дня.

В Советском Союзе с 1975 года разрабатывались микропроцессоры в Зеленоградском Научном центре (НИИ ТТ, НИИ МЭ), в Воронеже (ВЗПП, позже объединение «Электроника»), в Ленинграде (НПО «Светлана»). В 1976 году предприятия МЭП выпустили 300 млн интегральных схем, среди которых были микропроцессоры и микропроцессорные комплекты. Американская пресса в те годы писала, что отставание уровня развития советской электроники резко сократилось с 10 до 2–3 лет. К концу 70-х по всей стране выпускалось 700 млн ИС.

Это позволило наладить выпуск компьютеров отечественного производства, обеспечить бортовыми ЭВМ все военные объекты от космических аппаратов до подводных лодок.

Отечественная электроника и микроэлектроника были практически уничтожены экономическими реформами, начатыми в 1991 году. Ныне уровень развития отечественной микроэлектроники отстает уже не на год и не два. Кое-где предприятия сохранились, и наметилась тенденция к их возрождению в новых экономических и политических условиях. И как писал бывший начальник Главного научно-технического управления МЭП СССР В. М. Пролейко: «Неужели нужно событие, аналогичное Отечественной войне, чтобы руководители страны наконец-то осознали, что значит электроника сегодня? Или чтобы те, кто не хочет это осознать, не могли быть руководителями».

## **ГРЯДЕТ ЛИ НОВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ?**

А жизнь в микроэлектронике продолжается. За 40 лет развития ИС плотность размещения транзисторов на кристалле ежегодно увеличивается примерно на 50%. Это первым заметил Г. Мур, один из основателей фирмы Intel, основного разработчика серий микропроцессоров. За четыре десятилетия степень интеграции возросла в 10 000 раз(!).

Сегодня разработчики интегральных схем считают, что экспоненциальный рост степени интеграции будет сопровождаться экспоненциальным ростом потребляемой энергии. Масштабирование элементов транзистора, выход на субмикронные размеры порождает ряд трудно решаемых проблем.



Например, металлические токоведущие дорожки могут потерять свойство проводников и превратиться в емкостные и индуктивные элементы.

И масштабированные транзисторы уже не просто транзисторы. Так, по мере уменьшения длины каналов МОП транзисторов уменьшается толщина затворного окисла, а значит, и уменьшается пороговое напряжение. Чем меньше пороговое напряжение транзистора, тем больший ток требуется для переключения транзистора. Растут и токи утечки транзисторных структур. Подсчитано, что КМОП ИС с 0,09 мкм элементами и напряжением питания 1,2 В потребляет ток на два порядка больше, чем МОП микросхема с 0,25 мкм и напряжением питания 2,5 В.

Были предложены новые конструкции транзисторов, использующие баллистические электроны в полупроводниках. В такой конструкции полевого транзистора исток и сток располагаются один над другим на небольшом расстоянии. Эмиттируемые из истока *электроны благодаря своим волновым свойствам проходят межэлектродное расстояние в кристаллической структуре по баллистическим траекториям без рассеяния*. Если сделать расстояние между истоком и стоком или канал проводимости коротким, то быстродействие транзистора станет очень высоким. Разработаны транзисторы на баллистических электронах, использующие в качестве инжекторов электронов туннельный барьер. Конструктивно такой инжектор выполнен в виде тонкого слоя нелегированного твердого раствора AlGaAs, который располагается между уже легированными областями GaAs. Эти области имеют высокую плотность электронов. Такая конструкция была известна еще под названием *вертикальный транзистор*.

Заметим, что это полупроводниковые приборы на *горячих электронах*. Другими словами, электроны хотя и претерпевают много столкновений, тем не менее обладают высокой скоростью, а следовательно, высокой энергией. Первый такой транзистор был изготовлен из легированного кремния в 1979 году Дж. Шенноном из фирмы Philips. Спустя два года, в 1981 году в Корнельском университете был разработан транзистор на арсениде галлия. Прибор имел два барьера с легированной плоскостью, где происходит перенос горячих электронов.

Масштабы миниатюризации электронных схем, достигнутые сегодня, поражают воображение специалистов даже больше, чем непосвященных в тайны микротехники.

Выдающийся физик современности, лауреат Нобелевской премии 2000 года академик Ж. И. Алферов разработал теорию низкоразмерных электронных явлений, а также технологию производства гетероструктур. Эти приборы и устройства широко используются в системах телекоммуникаций, передаче сложных изображений.

А что будет завтра? Каким станет транзистор хотя бы в ближайшие 10 лет?

Прогнозируется, что через 10 лет минимальные топологические нормы составят 0,01 мкм. Исследователи найдут новые технологические решения, позволяющие объединить цифровые и аналоговые методы обработки информации.

Конец начала или начало конца микроэлектроники?



## ЛИНИИ РАЗВИТИЯ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ТРАНЗИСТОРУ

Исследование транзистора, поиск его оптимальных конструкций занимали умы многих исследователей в мире. Транзисторы и другие полупроводниковые приборы стали основой многих исследовательских программ. Изобретательский дух и творческая атмосфера, которые способствовали созданию транзистора, выдвинули электронную промышленность в ряды самых динамичных отраслей. В полупроводниковой электронике, как в фокусе, сконцентрировались достижения физики твердого тела, квантовой механики, кристаллографии, материаловедения и других областей фундаментальных и прикладных наук. Если в 30–40-е годы 90% объема продажи изделий ламповой электроники концентрировались в основном вокруг радиотехнических устройств, то уже в 50-е годы на радиооборудование приходилось не более 20%. Исследования и разработки новых изделий полупроводниковой электроники все время возрастают, оказывая существенное влияние на прогресс в смежных областях науки и техники. Электронные предприятия ежегодно расширяли номенклатуру своей продукции, рос приток инженеров как в электронную промышленность, так и в исследовательские центры по электронике. Широкий фронт исследований в современной полупроводниковой электронике позволил придать многим теоретическим изысканиям большую практическую направленность.

В 1930 году советский ученый Я. И. Френкель высказал идею, согласно которой при поглощении излучения в кристалле возникают два типа возбуждения: фотоактивный и нефотоактивный. При этом электрон связывался с образованной им дыркой в единую нейтральную систему, которую Я. И. Френкель назвал *экситоном*. В 1952 году было экспериментально доказано существование экситона — квазичастицы, соответствующей электронному возбуждению кристаллов полупроводника или диэлектрика. Выяснилось, что экситон способен мигрировать по кристаллу без переноса электрического заряда и массы.

Было отмечено существование в инерционной поляризуемой среде особого квантового стационарного состояния электрона — *полярона*. На это впервые указали советские физики Л. Д. Ландау (1933 год) и Я. И. Френкель (1936 год). Концепция поляронов существенно повлияла на развитие теории полупроводников.

Интересные результаты были получены при изучении воздействия корпускулярного облучения на физические свойства полупроводников, предвосхитившие разработку метода *ионного легирования и травления* в микроэлектронике.

Группа исследователей, используя введенный У. Шокли принцип транзистора с ловушкой в коллекторе, в середине 50-х годов предложила конструкцию твердотельного *тиратрона* путем добавления к транзисторной структуре еще одного *p-n*-перехода. Такая транзисторная конструкция, полученная на основе *p-n-p-n*- или *n-p-n-p*-структур и названная *тиристором*, обладала бистабильными характеристиками и способностью переключиться

из одного состояния в другое. В зависимости от способа включения  $p$ - $n$ -переходов различали тиристоры диодные (*динисторы*) и триодные (*тринисторы*). Благодаря двум устойчивым состояниям и низкой мощности рассеяния в этих состояниях тиристоры нашли широкое применение в устройствах для регулирования мощности, в электропреобразовательных высоковольтных устройствах и т. п.

Пожалуй, наиболее интересным случаем, когда фундаментальные исследования привели к появлению полупроводникового прибора, явилось создание *туннельного диода*. Многообразие функций, которые он мог выполнять (генерирование и усиление электромагнитных колебаний, переключение, преобразование частоты и т. д.), по технической значимости поставило создание туннельного диода вровень с открытием транзистора. Работа туннельного диода основана на туннельном эффекте, в соответствии с которым частицы могли с определенной вероятностью проникать через высокопотенциальный барьер. Этот эффект был предсказан в 1939 году русским ученым Г. А. Гаммовым. Диод на его основе был создан в 1958 году японским физиком Л. Эсаки. Он сумел сформировать чрезвычайно резкий переход между очень сильно легированными  $p$ - и  $n$ -областями в германии так, чтобы обедненная область в диоде была очень тонкой. Прилагая напряжение смещения в прямом направлении, Эсаки обнаружил возрастание суммарного туннельного тока в этом направлении. При увеличении напряжения смещения сверх некоторого значения ток в прямом направлении убывал вследствие уменьшения числа состояний электронов, доступных для туннелирования. Этот эффект эквивалентен возникновению отрицательного сопротивления, которое можно использовать для создания высокочастотных усилителей, генераторов, переключателей. Уже в 1959 году были разработаны туннельные диоды, работавшие на частотах свыше 1 ГГц. В ходе дальнейших исследований Эсаки открыл явление сильного возрастания магнитосопротивления при определенном значении электрического поля (эффект Эсаки), а в 1966 году обнаружил *сверхпроводящую энергетическую щель в полупроводниках*.

В 1959 году советский ученый А. С. Тапер с сотрудниками открыл явление генерации и усиления СВЧ-колебаний при лавинном пробое полупроводниковых диодов. В этом случае происходит лавинное умножение носителей заряда путем образования пар подвижных носителей при ударной ионизации атомов кристаллической решетки полупроводника подвижными электронами, ускоренными внешним электрическим полем. На основе этого открытия был создан *лавинно-пролетный диод (ЛПД)*, представляющий собой полупроводниковый диод с отрицательным сопротивлением в СВЧ-диапазоне. Идея создания ЛПД принадлежит американскому физiku У. Риду (1958 год), генерацию колебаний впервые осуществил А. С. Тапер с группой сотрудников (1959 год). В НИИ «Пульсар» под руководством В. М. Вальд-Перлова разработано 40 типоминиатурных арсенид-галлиевых ЛПД, работающих в диапазоне от 8 до 37 ГГц.

Различают несколько режимов работы ЛПД. Пролетный режим работы основан на использовании лавинного пробоя и пролетного эффекта носите-

лей в обедненной области различных полупроводниковых структур. Этот режим назвали также режимом IMPATT (ударная ионизация и пролетное время), а диоды, работающие в этом режиме, — IMPATT-диодами. Аномальный режим работы ЛПД с захваченной плазмой назвали режимом TRAPPAT (захваченная плазма, пробег области лавинного умножения), соответственно этому диоды, работающие в этом режиме, — TRAPPATT-диодами. ЛПД применяли для генерации и усиления в СВЧ-диапазоне на частотах от 10 до 100 ГГц с КПД до 50%.

На базе полупроводниковых параметрических усилительных диодов были созданы усилители сигнала, обладающие температурой шума в пределах 50–60 К без охлаждения и 25 К и ниже при охлаждении. Они нашли широкое применение в устройствах дальней связи, радиоастрономии, в системах спутниковой связи.

Одним из крупнейших научных достижений физики полупроводников стало создание советским академиком Н. Г. Басовым с сотрудниками полупроводниковых *лазеров* оптического и ближнего инфракрасного диапазонов. Они нашли широкое применение в оптических системах записи, хранения и обработки информации, в системах связи. Весьма перспективным явилось применение полупроводниковых лазеров в волоконно-оптических линиях связи.

В 1963 году американский физик Дж. Ганн обнаружил в кристалле арсенида галлия и фосфида индия с электронной проводимостью эффект генерации высокочастотных колебаний тока в сильных электрических полях. Образец полупроводника обладал *N*-образной вольт-амперной характеристикой, имевшей участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Этот эффект вызван периодическим появлением и перемещением в образце области сильного электрического поля — так называемого *домена Ганна*. На основе этого эффекта СВЧ-генераторы функционировали в диапазоне частот 0,3–2,0 ГГц. Для этой цели использовались полупроводники электронного типа GaAs, SnP, CdTe, ZnS, InSb, InAs, а также германий с дырочной проводимостью. Эффект Ганна используется в диодах Ганна для создания генераторов СВЧ-диапазона.

Проблему преобразования световой энергии в электрическую с помощью полупроводников одним из первых поставил советский академик А. Ф. Иоффе. Основополагающими в области фотоэлектрических свойств полупроводников были работы советских ученых Б. И. Давыдова, И. В. Курчатова, В. Е. Лошкарева, Ю. М. Кушнера, В. М. Тучкевича, Ж. И. Алферова и др. В 50-е годы был создан германиевый фотоэлемент, работавший в диодном режиме и управляющийся светом. Разработанные в США и СССР фотодиоды с *p-n*-переходом позволили существенно повысить КПД фотопреобразователей. Благодаря освоению технологии выращивания монокристаллов кремния были созданы *кремниевые вентильные фотоэлементы* большой площади со сравнительно большими КПД. Эти приборы нашли широкое применение в наземных и бортовых устройствах непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую.

КПД преобразования кремниевых элементов достиг 10–18%.

Дорогие арсенид-галлиевые приборы выгодно использовать при высокой концентрации света. В таком случае в процессе фотоэлектрического и фототермического преобразований КПД достиг значений 25%. Современной наукой поставлена задача создания установок, способных сделать фотоэлектрические источники конкурентоспособными по отношению к другим видам генераторов.

С 50-х годов стала разрабатываться идея использования  $p$ - $n$ -переходов для преобразования ядерной энергии в электрическую. При прохождении через кристалл проводника ионизирующие частицы вдоль своей траектории генерировали электронно-дырочные пары. Эти пары создавали напряжение на  $p$ - $n$ -переходе. Созданная на основе этого явления экспериментальная атомная батарея позволяла непосредственно осуществлять преобразование энергии радиоактивного излучения в электрическую энергию. Одновременно были созданы фотопреобразователи на основе сернистого кадмия, чувствительные к рентгеновским лучам и корпускулярному излучению. Они широко использовались в качестве дозиметров рентгеновского излучения и счетчиков  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц.

Одним из применений полупроводников явилось детектирование инфракрасного излучения. По своим технико-экономическим характеристикам полупроводниковые детекторы инфракрасного излучения на основе PbS, PbSe, PbTe, InSb существенно превосходили ранее использовавшиеся детекторы теплового излучения. *Термовизоры* на базе полупроводниковых детекторов инфракрасного излучения, которые начали разрабатываться в 60-х годах, нашли применение в различных областях науки и техники. По мере обработки отдельных узлов улучшились технические характеристики устройств. Применение системы на базе прецизионной оптики и полупроводниковых детекторов излучения со встроенным микропроцессором позволило измерять температуру в диапазоне от 30 до 2000°C с разрешающей способностью 0,1°C. Можно получить термальное изображение объекта на экране телевизора, используя естественное инфракрасное излучение этого объекта. Высокоскоростная цифровая память позволила хранить и обрабатывать информацию об измеренных значениях температур, выполнить сканирование термически неоднородных поверхностей. В последние годы основными приемниками инфракрасного и субмиллиметрового излучения в диапазоне длин волн от 6 до 500 мкм стали примесные фотоэлектрические приемники на основе кремния, германия, эпитаксиальных пленок арсенида галлия, антимонида индия. Созданы приемники излучения с разогревом носителей тока в полупроводниках. Все они нашли применение для наблюдения источников космического излучения, излучения Земли, для изучения распределения яркости Солнца по диску и т. д.

Полупроводники обладают повышенной чувствительностью к воздействию внешних факторов. Температурные, электрические, магнитные, электромагнитные поля, механические деформации зачастую приводят к изменению свойств полупроводниковых приборов за счет изменения их электрических параметров. Эти свойства полупроводников были использованы для создания различных датчиков и приборов на их основе. Разработаны и производятся полупроводниковые резисторы, использующие зависимость элек-

трического сопротивления от внешних факторов: *термисторы, фоторезисторы, варисторы, тензорезисторы*. Промышленные образцы термисторов, меняющих электросопротивление под действием тепловых полей, изготовлены из композиции полупроводников, которые подобраны так, чтобы коэффициент температурной зависимости сопротивления был максимально большим. Термисторы с положительным значением температурного коэффициента получили название позисторы, их разработка велась в начале 60-х годов. Термисторы, предназначенные для измерения мощности электромагнитного излучения в видимой, инфракрасной области спектра, а также в СВЧ-диапазоне, названы *болометрами*.

В ЛФТИ под руководством академика Ж. И. Алферова в 1970-х годах были широко развернуты работы по созданию новых полупроводниковых материалов типа  $A^3B^5$ . Именно эти материалы позволили создать так называемые *гетеропереходы* — полупроводниковый переход между двумя разнородными по химическому составу полупроводниками. В гетеропереходах происходит скачкообразное изменение ширины запрещенной зоны, подвижности носителей, их эффективной массы, энергии электронного сродства.

Нынешние высокие информационные технологии базируются на трех китах:

- на классической кремниевой технологии;
- на технологии полупроводниковых гетероструктур;
- на квантовых полупроводниковых приборах.

Советский физик Ж. И. Алферов с сотрудниками Ленинградского физико-технического института и американский физик Г. Кремер в начале 1963 года начали научное соревнование, целью которого было создание идеальных гетероструктур. На основе этих гетероструктур были созданы лазеры, которые могли работать в непрерывном режиме при комнатной температуре. На их основе были созданы волоконно-оптические системы связи. Эти гетероструктуры легли в основу бортовых и не только солнечных батарей с высоким КПД. *Гетеробиполярные транзисторы* на основе гетеропереходов вошли в состав связной портативной аппаратуры.

Успехи ЛФТИ были тесно связаны с предприятиями электронной промышленности. Это и предопределило успех в таком соревновании. За фундаментальные работы по созданию гетероструктурной электроники академик Ж. И. Алферов получил Нобелевскую премию в 2000 году.

На стыке научных направлений физики полупроводников появились интересные работы. Особенно интересны работы по акустоэлектронике. Здесь был предсказан и экспериментально обнаружен новый тип поверхностных акустических волн — *волны Гуляева — Блюстейна*. Пионером этого направления стал академик Ю. В. Гуляев и его сотрудники. Он провел фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования явлений увлечения электронов акустическими волнами, открыл акустоэлектрический и акустомагнетоэлектрический эффекты, поперечный акустоэлектрический эффект. Эти разработки на стыке полупроводниковой электроники и акустоэлектроники были широко использованы при создании акустоэлектронных устройств для систем связи и обработки информации.

Реальные пути стыковки дискретных полупроводниковых приборов с традиционными элементами связи открыла *оптоэлектроника*, представляющая особый раздел науки и техники, посвященной вопросам генерации и приема, а также преобразования и хранения информации на основе сочетания электрических и оптических методов и средств. Оптоэлектроника стала развиваться с 60-х годов на основе достижений квантовой электроники, полупроводниковой электроники, электрооптики, голографии, инфракрасной техники и т. д.

Но на развитии полупроводниковой и микроэлектроники точку ставить нельзя. Впереди впечатляющие достижения в нанoeлектронике, одноэлектронике, молекулярной электронике.

Но это уже другая история.

### МЕСТО МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В СФЕРЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В ведущих странах мира приоритетное внимание уделяется развитию электроники. В 2000 году объем продаж в этой области составил триллион долларов. Правительства динамично развивающихся стран (США, Франция, Германия) значительные усилия направляют на развитие конкурентоспособной электронной техники.

Другая группа стран, поставивших себе цель занять лидирующие позиции в экономическом росте и росте ВВП (Китай, Малайзия, Испания, Индия), предпринимают колоссальные усилия по созданию собственной электронной промышленности.

С этой целью разрабатываются национальные программы развития электроники. Предусматривается не только прямое государственное финансирование, но также и приоритетная поддержка в виде налоговых льгот, льготных кредитов на закупку технологических линий, государственных гарантий инвесторам, правовой защиты внутреннего рынка от импорта и т. д.

Реальная экономическая ситуация такова, что на рубеже веков роль электроники стала решающей не только в техническом плане, но и в интеллектуальном и, главное, в макроэкономическом аспекте.

Приведем несколько цифр. Экспорт отечественной продукции состоит практически из сырья и оценивается в 36 млрд долларов в год. Из них 14,5 млрд долларов приносит экспорт газа, 14 млрд долларов — экспорт сырой нефти, 4 млрд долларов — металл и 3,5 млрд долларов — военная техника. Прибыль обычно составляет четверть объема экспорта.

А вот другие цифры.

Годовые обороты американских электронных фирм, выпускающих изделия микроэлектроники, составляют порядка 200 млрд долларов. Это в 7 раз больше российского экспорта сырьевых энергоресурсов. Суммарный объем продаж электронных приборов и систем на порядок больше.

Мировое потребление электронной продукции растет и увеличивается на 15% в год, а в странах Азии и Тихоокеанского региона на 19% в год.

В 2003 году объем мирового производства полупроводниковой промышленности достигает рубежа 300 млрд долларов. За три года в три раза!

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)