

торный проект, предпосылки которого были в значительной степени заложены развитием радиолокации во время войны.

Именно в послевоенные годы фирма «Белл» начала формировать программу глобальной связи, т.е. быстрой и надежной связи каждого с каждым в планетарном масштабе. Ее реализация отметилась такими выдающимися достижениями, как спутниковая и оптоволоконная связь, мировое телевидение, цифровизация, Интернет, мобильные телефоны... А первым (и решающим!) шагом на этом славном пути стало создание транзистора.

Аппаратура связи сороковых годов прошлого века использовала для усиления, преобразования и коммутации сигналов в абонентских цепях два элемента: электронную лампу и электромеханическое реле. Они были громоздки, малонадежны, срабатывали медленно и потребляли много энергии. Усовершенствовать этих мастодонтов было бессмысленно – новой идее нужны и новые средства реализации.

Вспомнили о полупроводниках и создали соответствующую исследовательскую группу. Небольшую, всего из 6–7 человек разных специальностей, словно руководствуясь одним из афоризмов А.Эйнштейна о том, что в коллективах изобретателей «могут получиться группы укрывающихся от работы бездельников». Здесь были физик-экспериментатор, электротехник, физхимик, радиотехник, физик-теоретик, а во главе «великолепной семерки» поставили У.Шокли. Естественно, группа начала разрабатывать его предвоенную идею усилителя с эффектом поля, но электроны внутри полупроводника упрямо и, казалось бы, противостественно игнорировали любые изменения потенциала на управляющем электроде. От высоких напряжений и токов кристаллы даже взрывались, но никак не желали изменять свое сопротивление.

Задумавшись над этим, теоретик Дж.Бардин предположил, что значительная часть электронов на самом деле не гуляет свободно по кристаллу, а застревает в каких-то «ловушках» у самой поверхности полупроводника. Заряд этих «замороженных» электронов экранирует прикладываемое извне поле, не проникающее в объем кристалла. Так в 1947 году в физику полупроводников вошла теория поверхностных состояний. Отметим, что рождение новой теории – как следствия неудач на главном направлении поиска – есть лишь кажущийся парадокс, такова история и многих других открытий.

Теперь, когда, казалось бы, поняли причину неудач, начали более осмысленно реализовывать идею эффекта поля – других идей не было. Занялись различными способами обработки поверхности германия, надеясь устранить «ловушки» электронов: химическое травление, механическая полировка, нанесение на поверхность различных пассиваторов, погружение кристалла в жидкости. Кроме того, постарались максимально локализовать зону управления, для чего один из токоподводов и управляющий электрод изготавливались в виде близко расположенных подружженных иголок (рис.3). Ведущий экспериментатор группы

У.Браттейн имел за плечами почти 15-летний опыт исследования разнообразных полупроводников, был весьма искусен и обладал замечательной интуицией. А кроме того,

было известно, что «он мог 25 часов в сутки крутить ручки осциллографа, лишь бы было с кем поболтать». Его слушателем чаще всего оказывался Дж.Бардин, они сдружились, «теория» и «эксперимент» объединились. Однако время шло, а сколько-нибудь существенного результата не появлялось.

Однажды Браттейн, издергавшийся от неудач, сдвинул иголки почти вплотную, мало того, случайно перепутал полярности прикладываемых к ним потенциалов и... увидел на экране осциллографа усиление сигнала. Теперь наступило время теоретика, он сработал почти мгновенно и безошибочно: эффекта поля как не было так и нет, а усиление возникает совсем по иной причине. Во всех предыдущих оценках в расчет принимались только электроны – основные носители тока в германиевом кристалле, а «дырки», неосновные носители, которых было в миллион раз меньше, естественно игнорировались. А оказалось, что в них-то и «зарыта собака»: введение дырок через один электрод (этот процесс называли инъекцией) вызывает неизмеримо больший ток в другом электроде – так в кристалле происходит усиление тока. И все это на фоне неизменности состояния огромного количества электронов, как бы и не участвующих в процессе. Случайность привела к достижению неизмеримо большего, чем плановая атака, – очередной парадокс.

Через несколько дней группа придумала новому прибору звонкое имя – транзистор, поэтому вся совокупность процессов, протекающих в нем и вызывающих усиление сигналов, стали называть транзисторным эффектом.

На этом, однако, парадоксы транзистора и вокруг него не закончились. Через неделю после замечательного открытия в пред рождественский вечер 23 декабря 1947 года состоялась презентация транзистора высшему руководству фирмы. Признание успеха было полным, появилось шампанское, сырой зимний сумрак не помешал всеобщему ликованию, лишь Шокли едва удавалось скрывать разочарование. Да, он раньше других задумался о полупроводниковом усилителе, возглавил группу, просвещал и направлял своих сотрудников, но на соавторство в «звездном» патенте претендовать не мог.

А в звездности изобретения не сомневался никто. Характерно, что и в этом понимании Шокли был дальновиднее других: пока вокруг судили-рядили о замене радиоламп в приемно-усилительной радиоаппаратуре и в телефонии, он уже предчувствовал фантастические перспективы транзистора для осуществления логических операций в зарождающейся компьютерной технике. Но прямого вклада в сделанное откры-

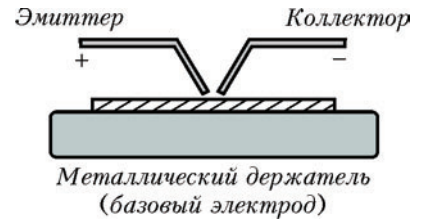


Рис. 3

подтверждение эйнштейновского афоризма о том, что «все с детства знают, что то-то и то-то невозможно, но всегда находится невежда, который этого не знает, он-то и делает открытие». Лишь через 30 лет сумели понять, что именно открыл Лосев: оказалось, что случайным образом в некоторых зонах кристаллов образуется подобие транзисторных структур, и, скользая иглой по поверхности, он наткнулся на эти зоны. Заграница не знала, что недавний школьник еще не очень силен в науках, и засыпала лабораторию письмами с обращением «Герр профессор» – победителей не судят. Заметим, к тому же, что уже очень скоро Лосев превратился в блестящего физика-экспериментатора и повторно заставил мир говорить о себе, открыв свечные полупроводники, которое позже стало основой для создания светодиодов.

Вернемся, однако, к транзистору. В конце 1930-х годов понимание физики полупроводников позволяло уже вполне осознанно подойти к созданию усилителя – для этого, как говорится, сформировались необходимые объективные условия. Нашелся и подходящий человек – американец У.Шокли. Окончив докторантуру в Массачусеттском технологическом институте, тогдашней «мекке» электронщиков, он поступил на фирму «Белл-Телефон». Блестящее знание квантовой механики и физики твердого тела, понимание задач, стоящих перед фирмой (ведущей в области телеграфно-телефонной аппаратуры и средств связи вообще), дополнялись у Шокли исключительным честолюбием и амбициозностью, без чего настоящего успеха не достичь. И в 1938 году в рабочем журнале 26-летнего Шокли появляется первый «набросок» полупроводникового триода (рис.2). Идея была проста:

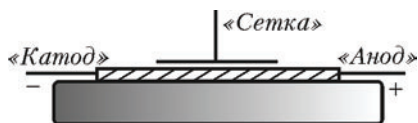


Рис. 2

сделать устройство, максимально похожее на электронную лампу, с тем лишь отличием, что электроны в нем будут протекать по тонкому нитевидному полупроводнику, а не пролетать в вакууме между катодом и анодом. Для управления током полупроводника предполагалось ввести дополнительный электрод (аналог сетки) – прикладывая к нему напряжение разной полярности, можно будет либо уменьшать, либо увеличивать количество электронов в нити, тем самым изменять ее сопротивление и протекающий по ней ток. Все как в радиолампе, но без вакуума, без громоздкого стеклянного баллона, без подогрева катода, эмиттирующего электроны. Вытеснение электронов из нити (или их приток) должно было происходить под влиянием электрического поля, создаваемого между управляющим электродом и нитью, т.е. благодаря полевому эффекту. Для этого нить должна была быть именно полупроводниковой: в металле электронов так много, что никакими полями их не вытеснить, а в изоляторе свободных электронов практически нет, так что и вытеснить нечего.

Идея начала подкрепляться теоретическими расчетами и подготавливаться к экспериментальной проверке, но... грянула вторая мировая война. Шокли был откомандирован в распоряжение Министерства обороны, где проработал до конца войны, занимаясь проблемами, далекими от полупроводников. Похоже сложились судьбы и большинства других исследователей полупроводников. Эта сфера пока еще не сулила конкретных достижений, полезных военным. Кроме детекторов, используемых в радиотехнике, – они оказались буквально в центре грозных военных событий, впервые в истории электроники показав, насколько тесно переплетается общая история с историей техники.

Летом 1940 года после оккупации гитлеровцами Западной Европы Англия оказалась один на один против армады нацистских бомбардировщиков, начавших планомерное разрушение ее обороны и подготовку морского десанта. От краха Англию спасли чудо, решительность нового премьера У.Черчилля и... радары (так на западе называли радиолокаторы). Появившиеся еще в предвоенные годы почти одновременно в СССР, Англии и США, радары позволяли быстро и точно обнаруживать вражеские самолеты и своевременно организовывать противодействие. В небе над Ла-Маншем развернулась грандиозная «битва за Британию», достигшая своего апогея 15 сентября 1940 года (именно эта дата выбита на мемориальном камне в Вестминстерском аббатстве – как важнейшая во всей биографии У.Черчилля), после чего гитлеровцы, потеряв более 1000 самолетов, отказались от идеи вторжения. Отметим, что много лет спустя одна из книг, посвященных тому времени, вышла под весьма выразительным названием: «Как горстка пионеров радиолокации выиграла вторую мировую войну!»

Итак, Англии нужны были радары, радарам – кристаллические детекторы, детекторам – совершенные германий и кремний. Война продвинула эту проблему необычайно быстро, и вскоре германий в значительных количествах появился на заводах и в исследовательских лабораториях – трамплин для прыжка к транзистору был готов. С кремнием, из-за высокой температуры его обработки, сначала дело шло не так гладко, но через несколько лет тоже успешно разрешилось.

Та война познакомила нас с интересным парадоксом. Гибель огромного количества людей (в том числе ученых и инженеров), уничтожение в невиданных масштабах промышленного и научно-технического потенциала, закрытие многих перспективных исследовательских программ и лабораторий, отрыв талантливой молодежи от высшего образования, общая разруха – все это, казалось бы, должно было отбросить предвоенные научные исследования на предстартовые позиции. Получилось иначе. Вторая мировая стала фактически первой войной, в которой наука и техника по своей значимости для победы выступили на равных с конкретными оружейными технологиями, а иногда и впереди них. При этом многие военные заделы не успели сработать «в реальном времени», но зря не пропали – фактически таковы атомный и ракетный проекты. Таков, как теперь нам очевидно, и транзис-

Парадоксы транзистора

Ю.НОСОВ

ПРОШЛЫЙ ГОД БЫЛ ОБЪЯВЛЕН ГОДОМ ФИЗИКИ. Сто лет тому назад в немецком журнале «Annalen der Physik» появились три статьи 26-летнего Альберта Эйнштейна – о теории относительности, квантовой теории фотоэффекта и теории броуновского движения, – которые обозначили поворот в развитии физики и обессмертили имя их автора. Теперешних историков и журналистов в тех публикациях более всего поражает их неожиданность, смелый разрыв с господствовавшими представлениями и традициями, парадоксальность. Оригинальность собственно научных результатов в дальнейшем дополнилась еще и огромным количеством афоризмов, анекдотов, парадоксов, которые великий физик «надиктовал» за 76 лет жизни. С его легкой руки парадоксальность стала «фирменным знаком» физиков-теоретиков: таковыми должны были отныне стать их гипотезы и теории, поведение и высказывания.

В некотором роде, за этим угадывалась парадоксальность самой жизни, не всегда нами замечаемая. Оказалось, что и в технической деятельности, казалось бы строго детерминированной и предсказуемой, неожиданностей, случайностей, парадоксов ничуть не меньше, чем при расшифровке тайнств Природы. Парадоксально ведет себя не только «техника», но и «техники», словно устанавливается некая мистическая связь между создателем и его созданием – они притягиваются и отталкиваются одновременно, великолепные находки и горькие потери идут бок о бок.

Ярчайшая иллюстрация к сказанному – история создания транзистора. Однако неизбежен вопрос: в наше время, когда человечество овладевает нанoeлектроникой и компьютерными технологиями, можно ли отыскать хоть что-то полезное в той давней истории? Даже 80-е годы прошлого века популяризаторы называют «компьютерным средневековьем», так стоит ли копать еще глубже? Авторитетные историки убеждают, что «история ничему не учит...»; однако это лишь половина цитаты, далее следует «...а только наказывает за незнание ее уроков» (В.Ключевский). История великих открытий всегда дает много больше, чем это видится даже самому проницательному взгляду.

Транзистор – детище полупроводников, и хотя «полупроводниковая сага» началась еще в 1833 году (М.Фарадей), в течение целого столетия обнаруживаемые в этой сфере явления оставались непредсказуемыми, невоспроизводимыми и необъяснимыми. Лишь после разработки квантовой теории полупроводников (А.Вильсон, 1931 г.) началось их подлинно научное исследование: обнаружили, что переносчиками электричества в них являются не только электроны, но и

подобные им положительно заряженные «дырки»; установили, что незначительные загрязнения кардинально изменяют свойства полупроводников; научились выплавлять достаточно совершенные и чистые полупроводниковые кристаллы. Задолго до этого эмпирически обнаружили, что с помощью полупроводников можно выпрямлять переменный ток (К.Браун, 1874 г.), и с начала XX века стали изготавливать диоды, пригодные для детектирования радиосигналов.

Эти детекторы, состоявшие из крохотного кристаллика и прижатой к нему пружинящей иглолочки (рис. 1), были немного проще и меньше вакуумных диодов, к тому же на высоких частотах эффективнее их. Естественно возник вопрос: нельзя ли и вакуумный триод – основу всей тогдашней радиоэлектроники – заменить полупроводником? Это был бы переворот, тем более что имелась и подсказка.



Рис. 1

Еще в 1922 году в Нижегородской радиолaborатории О.В.Лосев, экспериментируя с детекторами, обнаружил, что в некоторых точках кристалла игольчатый контакт проявлял не только детектирующее, но и усиливающее воздействие на радиосигнал. На вакуумный триод это не было похоже, но все-таки на основе открытого эффекта был разработан первый полностью полупроводниковый радиоприемник – за границей его назвали «кристадином Лосева». Лет пять слава кристадина и его создателя гремела по миру, но постепенно сошла на нет, так как игольчатая конструкция оказалась неэффективной и нестабильной, а электронные лампы очень быстро прогрессировали. (Для наших юных читателей заметим, что Олегу Лосеву не было тогда и 19 лет. Окончив школу в Твери, он один, без родителей перебрался в Нижний Новгород. На работу его взяли посыльным без предоставления общежития, так что жил он в здании лабораторий на лестничной площадке перед чердаком и, конечно, впроголодь.)

И вот – первый парадокс в нашем повествовании. В стремлении отыскать усиливающие точки на поверхности кристаллика Лосев исходил из неверного предположения, что всякий элемент с неомической характеристикой (как у детектора) должен обязательно усиливать радиосигналы. Любой мало-мальски грамотный специалист не стал бы ожидать усиления от детектора, но Лосев тогда еще не был специалистом, он иступленно повел свой поиск и... нашел искомое – прекрасное

тие он не внес и в патент не попал – такова бескомпромиссная моральная установка протестантского мира. (Что справедливее, нравственнее, корректнее в признании авторства – абсолютный индивидуализм, отгораживающийся от руководителя, учителя, вдохновителя, или российская общинность, щедрая на одаривание успехом своих коллег, – остается вопросом.)

Не станем, однако, фантазировать, что творилось в душе Шокли, но проявилось это в вулканическом

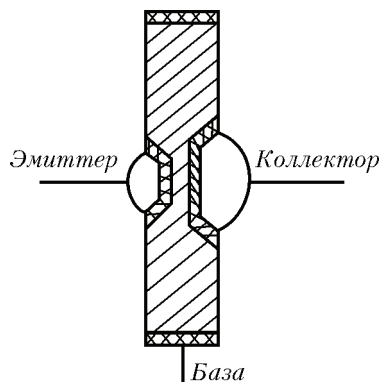


Рис. 4

выплеске его творческой энергии. Позднее, вспоминая то время, Шокли говорил о своей «страстной неделе», в течение которой он создал теорию транзистора с $p-n$ -переходами, заменившими экзотические иглопочки, а в самую новогоднюю ночь изобрел плоскостной транзистор (рис.4). Это уравняло его в правах на открытие транзисторного эффекта с изобретателями точечного транзистора У.Браттейном и Дж.Бардином.

Через полгода, 30 июня 1948 года в Нью-Йоркской штаб-квартире фирмы «Белл» прошла открытая презентация транзистора. В то время уже началась «холодная война» между США и СССР, поэтому технические новинки прежде всего оценивались военными. Удивительно, но эксперты из Пентагона «приговорили» транзистор к использованию лишь в слуховых аппаратах для старичков, хотя уже через пару лет новый прибор стал незаменимым элементом аппаратуры управления боевыми ракетами. Сейчас это представляется парадоксальным, но тогда близорукость военных спасла транзистор от засекречивания. Парадоксально и то, что презентация осталась почти незамеченной: репортеры изнемогали от нестерпимой жары, а их боссы – от первых заморозков «холодной войны». Все же пара абзацев о транзисторе появилась в «Нью-Йорк Таймс» на 46 странице в разделе «Новости радио» после пространной заметки о возобновлении репортажей некой «несравненной мисс Брукс». Таким было явление миру одного из величайших открытий XX века, а возможно, и всей истории человечества.

Заметим, что вряд ли справедливо обвинять тогдашних экспертов в некомпетентности – представленный им тогда кристаллик германия с прижатыми к нему иглопочками (точечный транзистор) прожил лишь 5–7 лет, вскоре его полностью вытеснил плоскостной транзистор, начавший свое триумфальное шествие по миру. И в 1956 году У.Шокли, Дж.Бардин, У.Браттейн были удостоены Нобелевской премии по физике «за исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Поучительно напомнить об одном «зигзаге удачи», который история того времени продемонстрировала

нашим ученым. В годы, предшествующие изобретению транзистора, в СССР были достигнуты значительные успехи в создании германиевых и кремниевых детекторов. В этих работах использовалась оригинальная методика исследования приконтактной области путем введения в нее дополнительной иглы, вследствие чего создавалась конфигурация, в точности повторяющая точечный транзистор (см. рис.3). Как позднее вспоминали, иногда при измерениях выявлялись и транзисторные характеристики, но их отбрасывали как случайные и неинтересные аномалии. Мало в чем наши исследователи уступали американским специалистам, не было у них лишь одного – нацеленности на транзистор, и великое открытие выскользнуло из рук.

Однако были просмотры и у американцев. Еще на подступах к транзистору в ноябре 1947 года Дж.Бардин, пытаясь избавиться от «ловушек», изобрел простенькую структуру, в которой металлическая игла прижималась к окислу, покрывающему полупроводник. По оценкам автора, под окислом мог образоваться тонкий инверсный слой дырочной проводимости (на электронном полупроводнике), и в нем не сложно было бы реализовать усиление на основе эффекта поля. Фактически был изобретен простейший МОП-транзистор (металл – окисел – полупроводник), который с середины 1960-х годов стал основой больших и сверхбольших интегральных схем. Вот и совсем неожиданный парадокс: не будь тогда изобретен точечный транзистор, вполне вероятно, что был бы «доведен до ума» МОП-транзистор, а от него – полшага до МОП-микросхем, которые появились бы лет на 15 раньше. Но все произошло, как произошло, и изобретение Дж.Бардина так и осталось «бумажным патентом», а действующий МОП-транзистор изобрели в 1960 году другие.

Отметим, однако, что славы Дж.Бардину хватило и без этого: в 1951 году он ушел из фирмы «Белл», занялся теорией сверхпроводимости и в 1972 году вместе с двумя своими учениками был отмечен Нобелевской премией «за разработку теории сверхпроводимости», став, таким образом, единственным в истории ученым, дважды удостоенным Нобелевской премии по физике.

Что же касается «транзисторной саги», то изобретение точечного транзистора, а вслед за ним и биполярного плоскостного транзистора стимулировали такую активность по всем направлениям, которая вскоре привела к созданию силовой электроники (транзисторы и мощные диоды), солнечных элементов, фоточувствительных ПЗС-матриц для видеокамер, плоскостных дисплеев, светодиодов и гетеролазеров (Ж.Алферов, 1968 г.) – словом, всего того многообразия приборов, которые составляют основу современной электроники и информатики.