

ТРАНЗИСТОР – НАШЕ ВСЕ

К ИСТОРИИ ВЕЛИКОГО ОТКРЫТИЯ

Открытие транзисторного эффекта, изобретение транзистора занимает особое место среди великих открытий в истории техники. Без транзистора не было бы компьютеров, мобильных, видеокамер, Интернета – всего того, без чего немислима жизнь современного человека. Появление транзистора обозначило начало очередной цивилизационной ступени – создание информационного общества. Характерно, что когда в конце 1970-х годов предметно заговорили об этом, то количественный критерий перехода к такому обществу определили как достижение уровня 10^{18} транзисторов на удовлетворение нужд каждого его члена. Среди главных хитов XX века – автомобиль, самолет, ракета, атомная энергия – транзистор (в составе электронной аппаратуры) востребован наибольшим числом людей, пожалуй что и всеми. В истории нового времени, т. е. после Ньютона, транзистор ставят в один ряд с паровой машиной, основой промышленного переворота, и лампочкой накаливания, которая обеспечила выполнение первого условия сотворения мира – "Да будет свет!". История создания транзистора пока не написана, о ней мы судим по историческим обзорам и мемуарам, исключительно зарубежным. Автор посчитал необходимым дополнить имеющиеся источники свидетельствами наших ветеранов электроники и провел интервью со многими из них. Фрагменты этой устной истории использованы в настоящей статье. В эпоху создания транзистора ярко проявились масштабные "составляющие": определяющая роль социального заказа, лидеры, великая цель; логика и случайность научного поиска; действие внешних факторов; борьба амбиций, накал страстей, разочарования и восторги. А кроме всего – это был увлекательный американский триллер, вобравший в себя детективную интригу, стремительно ускоряющийся экшн, блистательный хеппи-энд. Оставайтесь с нами.

Ю.Носов, д.т.н.

Противопоставлять изобретения из разных сфер техники хлопотно и не креативно, иное дело – сопоставлять. Решающих критериев для такого сопоставления должно быть, по нашему мнению, всего два: насколько полезно данное изобретение, имея в виду прежде всего его гуманитарную составляющую и повышение качества жизни, и насколько оно вредно человеку и природе. Конечно, могут быть и другие существенные критерии оценки изобретения, как например его своевременность (радиолокация спасла Англию от фашистского вторжения в 1940 году, тогда ее своевременность была единственным критерием ее значимости), но, все же, они обычно носят частный, не общечеловеческий характер.

Паровая машина с КПД $\approx 10\%$ как технический объект далека от совершенства. Она "повинна" в уничтожении лесов и каменного угля, ее жизненный цикл составил лишь сотню лет. В этом ей подобна и лампочка накаливания, уход которой из нашей жизни прогнозируется в ближайшие 20–30 лет. Транзистор в выполнении своего функционального предназначения и в экологической привлекательности – почти идеальный технический объект, он счастливо прожил 60 лет, его будущность непоколебима (а аналог-предшественник – электронная лампа – не дотянула и до пятидесяти).

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ

Даже в облегченном школьном варианте эта история не укладывается в линейную схему: "обществу потребовалось – наука созрела – явился первопроходец – пожалте вам транзистор". Да, необходимость в транзисторе "вита в воздухе", но поначалу она улавливалась лишь немногими – в конце 1930-х годов лидеры ведущей американской телекоммуникационной фирмы Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) стали ощущать неудовлетворенность радиолампами и электромеханическими реле – основными элементами оконечных устройств радио- и проводных каналов связи. Радиолампа громоздка, неэкономична, недолговечна – нет смысла перечислять все ее из-



вестные недостатки, – реле смотрится совсем уж динозавром. Альтернатива виделась в категорическом отказе от вакуума, т.е. в твердотельном электронном приборе. Металлы и изоляторы сразу же отпали – в одних электронах слишком много, в других слишком мало. Подходящими виделись лишь полупроводники, тем более что полупроводниковые диоды-выпрямители уже были хорошо известны.

Сказано – сделано. Концепция "полупроводниковой лампы" появилась в рабочем журнале Уильяма Шокли, научного сотрудника Bell Labs, 29 декабря 1939 года (рис.1). Казалось, что, подавая на "сетку" напряжения разной полярности, можно вытеснять электроны из полупроводника или втягивать их в него и тем самым изменять его сопротивление и ток "катод-анод". Однако тогдашний "главный" полупроводник – закись меди – был настолько "грязен", невоспроизводим и необъясним, что даже начать осмысленные эксперименты не удалось. А тут грянула Вторая мировая война, и Шокли до конца 1945 года пришлось заниматься задачами флота и авиации, далекими от полупроводников.

Война, как ни парадоксально это кажется на первый взгляд, всегда ускоряет научно-технический прогресс. Гибнут массы людей, в том числе и ученых, разрушается промышленный и научно-технический потенциал, для многих обрывается высшее образование, закрываются перспективные исследования – всеобщее бедствие и горе. Но Клио – девушка малосентиментальная, скорее циничная. Ей интересны не жертвы, а "сухой остаток". Война порождает мощнейший всплеск энергии, инициативы, изобретательности. Вторая мировая стала первой войной, в которой наука напрямую дополнила традиционное оружие. Для США успехи атомного проекта, ра-

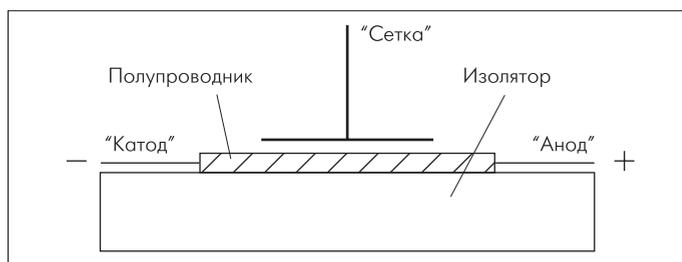


Рис.1. "Полупроводниковая лампа", предложенная У.Шокли

диокации, СВЧ-электроники удачно сочетались с массовым притоком специалистов-беженцев из Европы, а также с тем, что страна не подверглась разрушениям. Поэтому в первые послевоенные годы именно в США началась разработка ряда масштабных проектов, в частности проекта глобальной связи, выдвинутого фирмой Bell Labs.

Необходимость транзистора теперь уже не просто "витала в воздухе", кроме связанной аппаратуры "заявки" на него поступили от зарождающейся вычислительной техники, средств радиовзрывателей, систем наведения ракет. В одночасье еще не созданный транзистор стал нужен всем. Но каких-либо реальных проектов на горизонте не виделось. Поэтому созданная в начале 1946 года на фирме Bell Labs исследовательская группа, нацеленная на создание полупроводникового усилителя, оказалась в чистом поле, одна. Казалось бы, в подобной ситуации работа могла разворачиваться по-академически неспешно, с сытными корпоративными уик-эндами. Да получилось-то совсем не так...

В порядке отступления вспомним, как 15 лет спустя, в 1962 году, раскручивался полупроводниковый лазерный проект, когда в гонке за приоритетом поначалу счет шел на месяцы, потом на недели, наконец, на дни. Но это объяснимо – в лазерном дерби сразу три американские

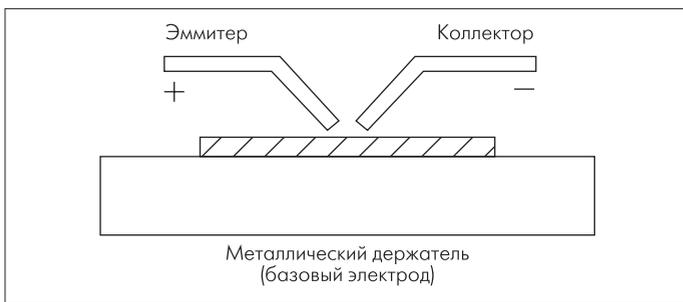


Рис.2. И наконец, первый вариант транзистора

лаборатории дышали в затылок друг другу, а кроме того, все они опасались еще и темной лошадки – ленинградского Физико-технического института: от русских после недавнего гагаринского взлета можно было ожидать любого сюрприза. Заметим, что эти лаборатории выкладывались не зря – двух первых на финише разделили всего десять дней.

Транзисторная группа не имела конкурентов, но в ней были собраны Личности, а значит – амбиции, озарения, непредсказуемость и неуправляемость, характеры, не всегда покладистые, – вот вам и игра страстей, обязательная для творчества.

"Техзадание" на разработку будущего транзистора, декларирующее, что "существуют большие возможности получения новых полезных свойств путем управления расположением атомов и электронов, из которых состоят твердые тела", казалось бы, было академически расплывчатым, но императив "существуют" не позволял довольствоваться отрицательным результатом. Руководителем группы – директором программы – назначили У.Шокли, вернувшегося в 1945 году из пентагоновского офиса в Bell Labs. В костяк группы вошли еще два физика: экспериментатор Уолтер Браттейн, сотрудник фирмы с 1929 года, и теоретик-университетчик Джон Бардин, уже прославившийся в области физики металлов (в 1940 году его обзор был опубликован в СССР в журнале "Успехи физических наук").

Естественно, группа занялась реализацией предвоенного проекта Шокли, основанного на "эффекте поля" (см. рис.1). Но теперь экспериментировали на германии и кремнии – к тому времени научились изготавливать эти материалы весьма совершенными, так как они использовались в радиолокационных детекторах. Но, как и прежде, электроны в кристалле упрямо игнорировали команды "сетки", эффект поля почему-то не срабатывал. Важнейшим событием весны 1946 года стала гипотеза Бардина о наличии на поверхности полупроводника "ловушек", захватывающих электроны, заряд которых и экранировал поле "сетки". Не видя путей преодоления этого, группа на долгие полтора года погрузилась в отвлеченные проблемы, которые, вроде бы, не приближа-

ли их к главной цели. Бардин создал теорию поверхностных состояний, Шокли – теорию p-p-перехода. Но оказалось, сами того не ведая, они готовили трамплины для решающих прыжков.

В середине ноября 1947 года ученые обнаружили, что, поместив германий в электролит, можно "очистить" ловушки от электронов. Вектор дальнейших поисков обозначился четко. Последовал "magic month" (магический месяц, выражение Шокли) – электролит заменяли окислами, пленками металлов, наконец, подпружиненной иглой, прибивив ее почти вплотную к "сетке", выполненной в виде такой же иглы (рис.2). И 15 декабря 1947 года Браттейн на экране осциллографа увидел усиление сигнала, да не лишь бы какое, а в десятки раз. Победа! Но удивительно, это произошло при полярностях потенциалов на иглах, обратных тем, которые "следовало" подавать. Вот она счастливая случайность, верная подруга великих открытий. У.Браттейн не проворонил ее, честь ему и хвала.

Настало время Теории. При успехе Эксперимента она всегда быстро и весело объясняет, что именно так все и должно быть, что она вроде бы именно это и предсказывала – о вчерашних иллюзиях забывается. Бардин угадал, что главными игроками являются неосновные носители – дырки, инжектируемые в кристалл приконтактной зоной одной из игл. Электроны же, которых неизмеримо больше чем дырок, при сем лишь недвижно присутствуют (раньше бы следовало вспомнить библейское "не презирайте ни одного из малых сих"). Обнаруженный транзисторный эффект был описан тремя звеньями: игла, на которую подано прямое смещение, инжектирует дырки в кристалл, дырки диффундируют к другой игле, смещенной в обратном направлении, и захватываются ею. При разных схемах включения можно получить усиление мощности, тока, напряжения.

Демонстрационная установка одновременно стала и макетом транзистора (так окрестили новый прибор). Эффект и прибор – две ипостаси одной и той же сущности. Пожалуй, это характерно для многих открытий современной физики, так как они сплошь и рядом совершаются в "естественно-искусственной" среде.

Демонстрацию открытия руководству фирмы назначили на пред рождественский вторник 23 декабря 1947



Рис.3. Герои дня: У.Шокли (сидит), У.Браттейн (стоит справа) и Д.Бардин (стоит слева)



года – американцы вообще любят красиво "конструировать историю", так почему бы и теперь не ассоциировать рождение транзистора с рождением самого знаменитого младенца. Успех отметили шампанским и разошлись, чтобы после каникул начать интенсивную подготовку к публичной презентации. Она состоялась лишь через полгода 30 июня 1948 года. Поэтому именно 1948 год считают годом открытия транзисторного эффекта. (Формально это оправдано еще и тем, что приоритет транзисторного патента датирован 17.06.48, остальное – предыстория.) Событие удостоилось двух абзацев в разделе "Новости радио" на 46 странице газеты "Нью-Йорк Таймс". Новая эра электроники началась без аплодисментов (мемуаристы, утверждающие, что она "привлекла всеобщее внимание" чаще всего "видят" события из будущего – так должно было быть, значит, так и было). Тому были причины. Действительно, так ли уж мог всколыхнуть общественность прибор, который "в некоторых случаях может использоваться вместо электронной лампы" (строки из репортажа газеты). Пентагон разрешил открытую презентацию – военным прибор неинтересен. Значит, они увидели в нем какую-то червоточину? Да и сама фирма Bell Labs не очень потратилась на рекламу. Реально продавать пока было нечего, представленный прибор не имел значительной коммерческой перспективы. (Правда, кто-то из журналистов тогда же возвестил: "в электронике появилась атомная бомба, величиной с горошину" – фантасты и журналисты частенько оказываются лучшими провидцами, чем специалисты.)

Недостатки первого варианта транзистора, названного го точно-контактным, или просто точечным, оказались слишком существенными и принципиально неустранимыми: громоздкость, невозпроизводимость параметров, оперирование лишь со слабыми сигналами, низкая устойчивость к механическим воздействиям. Уникальность эффекта и убогость его приборной реализации могли породить полное разочарование в транзисторе, но к счастью, почти тогда же выяснилось, что презентация была не финишем транзисторного проекта, а стартом его самого главного этапа. Начиналась совсем другая игра...

УИЛЬЯМ ШОКЛИ

День декабрьской презентации 1947 года выдался дождливым, но пасмурное небо не помешало всеобщему ликование собравшихся. Хмурым оставался лишь один человек – руководитель транзисторной группы Уильям Шокли, не скрывавший своего разочарования. Джек-пот пролетел мимо – транзисторный патент оформлялся на Уолтера Браттейна и Джона Бардина, "административный ресурс" руководителя в Америке не принимают во внимание. Шокли первый загорелся идеей транзистора, возгла-

вил группу (рис.3), читал ей лекции по квантовой теории полупроводников, упрямо вел к цели. Но не участвовал в итоговом аккорде и теперь оказался на вторых ролях. Что это означало для амбициозного индивидуалиста, читателю иной ментальности невозможно вообразить! К "счастью" – для Шокли – точечный транзистор был явно нежизнеспособен, его надо было не усовершенствовать, а отбросить, и на том же принципе создать что-то совсем иное. Шокли это понял сразу и был готов к новому как никто другой – не зря он разрабатывал теорию p-n-перехода. Надо было лишь забыть о своей же идее "эффекта поля" (конечно же, только на время, Шокли от своих идей не отрекался) и переключиться на транзисторный эффект. Его творческая энергия сфокусировалась в одну точку, рождественские каникулы стали его "страстной неделей", и ночью 31 декабря 1947 года ему как бы приснился транзистор с p-n-переходами, будущий биполярный плоскостной транзистор (видимо, так бывает, когда сон и явь становятся неразличимы, вспомним Менделеева, которому "приснилась" Периодическая система элементов). Окончательная концепция сформировалась к 23 января 1948 года, дата патентного приоритета – 26.06.48, экспериментальное подтверждение состоялось в апреле 1949 года, а в 1950–51 годы началось изготовление сплавных германиевых транзисторов. Вот теперь преимущества транзистора перед радиолампой – твердотельность, сверхминиатюрность, неограниченная долговечность – стали явью, а что еще не реализовалось, вполне логично домысливалось. Стало ясно, что транзистор интересен не только и не столько тем, что может заменить радиолампу, сколько тем, что может дать то, на что радиолампа в принципе неспособна. В 1952 году впервые была высказана идея интегральной схемы – транзистор Шокли позволял об этом думать вполне реально.

Дальнейшие события развивались преимущественно в технико-технологической и производственной сферах. Во время Корейской войны (1950–1953 годы) плоскостные транзисторы прошли боевое крещение, теперь генералов

смущала только их низкая рабочая температура. Поэтому с середины 50-х годов прошлого столетия вместо германия стали использовать кремний. Рабочая температура транзисторов поднялась до 125–150°C, а кроме того кремниевые транзисторы оказались значительно стабильнее и надежнее германиевых. В 1958–1959 годы была разработана особая технология изготовления кремниевых приборов, объединившая в единый процесс такие высокопроизводительные операции обработки пластин, как диффузия примесей, фотолитография, эпитаксиальное выращивание, напыление тонких пленок металлов и др. Все эти операции велись лишь в одной плоскости пластины, так сказать в плане, поэтому разработанный многостадийный процесс назвали планарной технологией. Односторонняя, планарная структура транзисторов стала решающим фактором, позволившим автоматизировать сборку.

В порядке отступления заметим, что планарная технология оказалась достаточно универсальной и нашла широчайшее применение в самых различных областях твердотельной электроники. Это наивысшее технологическое достижение вообще, прообраз технологий будущего, она обрела самостоятельную значимость, сопоставимую со значимостью транзистора. (Для междисциплинарных сопоставлений полезно ввести понятие "пределной технологии", обеспечивающей изготовление изделий определенного класса во всем необходимом диапазоне изменения их конструктивных параметров при минимизации экологического вреда. Планарная технология – это почти идеальное приближение к предельной технологии твердотельной электроники.)

На основе планарной технологии в 1959 году были созданы интегральные схемы, и в дальнейшем транзистор стал "приходить" к пользователю преимущественно как элемент таких схем, отчего его значимость не только не уменьшилась, но напротив – еще более возросла. В 1960 году был создан полевой транзистор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзистор), ставший основой сверхбольших интегральных схем. Но общие принципы и понятия полупроводниковой электроники, разработанные в 1947–1949 годы, – транзисторный эффект, р-п-переход, эффект поля, транспорт электронов и дырок – неизменно сохраняются и работают в микросхемах всех последующих поколений. Более того, эти принципы стали основой при изобретении и создании подавляющего числа других приборов полупроводниковой электроники, таких как разнообразные диоды, тиристоры, приборы с зарядовой связью, светодиоды, наконец, гетеролазеры.

В 1956 году Уильям Шокли, Джон Бардин, Уолтер Браттейн получили Нобелевскую премию "за исследование полупроводников и открытие транзисторного эффек-

та". Браттейн показал себя подлинным патриотом и ветераном фирмы Bell Labs, проработав на ней до ухода на пенсию в 66 лет и занимаясь исследованием поверхностных свойств германия и кремния. Он побывал в Москве, в ФИАНе прочел лекцию все о тех же поверхностных свойствах полупроводников, его вежливо выслушали, но не более того. Бардин тоже показал себя патриотом, но не какого-либо учреждения, а единственно – патриотом теории твердого тела. В 1951 году он перешел в Иллинойский университет, где стал одним из соавторов теории сверхпроводимости (теория Бардина–Купера–Шиффера, или БКШ-теория), которая в 1972 году была отмечена Нобелевской премией. Бардин – единственный человек, дважды удостоенный Нобелевской премии по физике. Говорят, что в то утро, когда он узнал о своем втором "Нобеле", Бардин долго не мог открыть закапризничавший транзисторный замок гаража – так напомнило о себе ревнивое прошлое, поздравляя с новым успехом и коря за расставание с полупроводниками.

Историк Г.Хафф обратил внимание на патент Бардина (без соавторов) от 23.11.1947 года, в котором заявлена структура, напоминающая МДП-транзистор. Поскольку именно МДП-транзисторы стали основой микроэлектроники и с учетом того, что Бардин также автор первого транзисторного патента, Хафф провозгласил Дж.Бардина "отцом современной электроники". Вероятнее всего, эту пафосность сам Бардин вряд ли бы признал строго корректной, но то, что он был "великим физиком современности" (Ж.Алферов), несомненно.

Ключевая фигура всего транзисторного проекта – Уильям Брэдфорд Шокли. Навсегда остались в электронике его плоскостные транзисторы, как биполярные, так и полевые, в 1949–1950 годы вышел в свет ряд его статей по теории приборов с р-п-переходами и фундаментальная монография "Электроны и дырки в полупроводниках" – все это стало классикой, образовало каркас новой электроники. Пришло время изобретать новые типы транзисторов, изготавливать их, передавать в промышленность. В 1955 году Шокли оставил Bell Labs, перебрался в Калифорнию и организовал собственную фирму в наспех переоборудованном сарае для хранения абрикосов. Но помощники – преимущественно его прежние аспиранты – не захотели заниматься "транзисторной рутинной" и вскоре оставили учителя. "Предатели" – прогремело вслед восьмерке отступников. Шокли продержался в "бизнесе" еще несколько лет и возвратился "на круги своя" – профессором в Стэнфордский университет. (А "отступники" угадали: через два года разработали планарную технологию, позднее основали знаменитую компанию Intel и стали лидерами в микроэлектронике.)

В 1960 году А.Ф.Трутко (будущий директор НИИ "Пульсар") стажировался в Стэнфорде и после одной из лекций



подошел к Шокли и попросил надписать его книгу, изданную у нас в 1953 году. Профессор с доброжелательной заинтересованностью отнесся к тому, что, оказывается(!) его лекции посещает "симпатичный советский русский", сделал теплую надпись, начинавшуюся с "To Anatole", и не преминул разразиться саркастической тирадой: "Мало того, что ваши не заплатили мне гонорар за книгу, они еще выкинули из нее важный раздел, да меня же и обругали...". То, что при переводе был исключен параграф с изложением "идеалистических взглядов физика Бриджмена, с которым автор полностью солидарен", вполне понятно – время у нас было такое, "чуждую" идеологию пропагандировать не допускалось. Но так ли уж обязательны были в предисловии редактора перевода пассажи типа "серьезным недостатком книги является замалчивание работ советских ученых" или примечания, "которые должны помочь советскому читателю разобраться в ошибочных высказываниях автора и понять значение советской науки...". Шокли ведь создавал не антологию советских научных работ и не историю полупроводниковой науки, да и кого бы из "наших" обязательно надо было процитировать в аспекте германиевых и кремниевых р-п-переходов? И совсем уже "сверхпрограммной" отсебятиной звучат точечные "уколы": "материал изложен недостаточно последовательно", "читатель... будет обманут в своих ожиданиях", "несмотря на указанные выше недостатки". Все это – о первой транзисторной библии!

Через пару лет У.Шокли в составе делегации IEEE приезжал в Москву на съезд Общества им. А.С.Попова. В качестве переводчика и сопровождающего к нему прикомандировали аспиранта ИРЭ Ю.В.Гуляева (будущего академика и директора ИРЭ). Придя для первого знакомства в гостиницу "Националь", Юрий Васильевич прямо с порога торжественно начал с домашней заготовки: "Я горд, что буду сопровождать Вас, одного из трех изобретателей транзистора...", но был резко прерван профессором: "Каких трех? Изобрел только Я, Бардин и Браттейн – это точечный транзистор, который тут же и умер. А мой – живет". (Из моего интервью Ю.В.Гуляева. Я специально переспрашивал о достоверности инцидента – "Как сейчас вижу его возбужденное лицо при этих словах", был ответ Юрия Васильевича.)

У Шокли было много общего с будущим шахматным "enfant terrible" – Робертом Фишером. Тот же абсолютный индивидуализм и убежденность в своей исключительности, та же бескомпромиссность в достижении цели и безразличие к реакции окружающих, тот же максимализм в формулировании этой цели и та же... Один журналист, перечисляя многочисленные фишеровские выверты, подытожил: "Единственное смягчающее обстоятельство – его гениальность". Вот оно, ключевое слово к характеристике и нашего героя.

Шокли – человек многих интересов, его увлекала история и философия науки, хотя, признаем, что при крайнем субъективизме бесстрастно изложить историю транзистора ему не очень удавалось. Но поиск его всегда увлекателен, это – не остывшая манная каша Браттейна. От философии науки он естественно перешел к природе творчества, увлекся идеей искусственного выведения совершенных человеческих особей и на этом пути нарушил общепринятое молчаливое табу – стал сопоставлять мыслительные способности представителей разных рас. Политкорректный мир обвинил его в расизме, но может ли политкорректность быть аргументом в научных исследованиях? Сегодня вопрос о генетической неодинаковости рас уже не является запретным. Жаль, что в своих искажениях Шокли все дальше уходил от физики, а ведь он был первым, кто заметил, что "транзистор вызвал к жизни новую физику" (название его Нобелевской лекции).

Уильям Шокли скончался в 1989 году на 80-м году жизни, Уолтер Браттейн – в 1987 на 86-м, Джон Бардин – в 1991 на 83-м.

Продолжение в следующем номере.

ЛИТЕРАТУРА

Shockley W. The path to the conception of the junction transistor.– IEEE Trans., 1976, ED-23, № 7, p.597–620.

Brattain W.H. Discovery of the transistor effect.– Adventures in the experimental Physics, 1976, v. 5, p.1–31.

Pearson G.L., Brattain W.H. History of Semiconductor Research. – Proc. IRE, 1955, v. 43, p.1794–1806.

Huff H.R. John Bardeen and transistor physics. – ULSI Process Integration, 1999, PV99-18, p.19–55.

Bardeen J. Three men who changed our world, 25 years later. – Bell Labs. Rec, 1972, p.335–341.

Носов Ю.Р. Прибор под названием транзистор. – НГ– Наука, №4, декабрь, 1997.