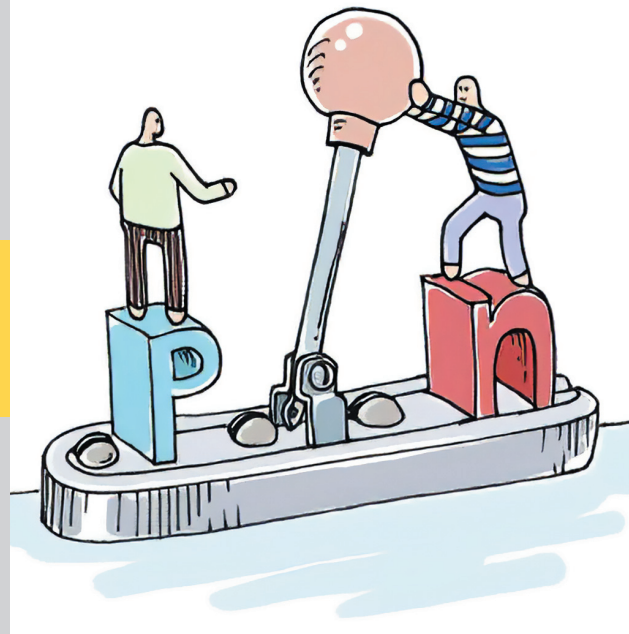




АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,
д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

Расскажем об основных открытиях и изобретениях в области полупроводников гениального современного физика со сложным и противоречивым характером. Статья посвящена 110-летию со дня рождения Уильяма Шокли.



УИЛЬЯМ ШОКЛИ — ОТЕЦ ТРАНЗИСТОРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Уильям Шокли (William Shockley, рис. 1) родился в Лондоне в семье американского горного инженера [1, 2]. Вскоре его семья вернулась в Америку и поселилась в калифорнийском городке Пало-Альто.

Уильям был буйным и трудным ребенком, поэтому начальное образование получил дома. Обучался в двух калифорнийских университетах, а затем защитил

в 1936 г. в Массачусетском технологическом институте докторскую диссертацию по физике твердого тела. После чего был приглашен в нью-йоркскую лабораторию Bell Labs директором по исследованиям Мервином Келли (Mervin Kelly) [3]. Эта лаборатория компании AT&T была образована в 1925 г. для объединения ученых разных специальностей. Однако Келли считал, что для успеха такого коллектива необходим лидер — гений в своей области. И именно такого человека он увидел в молодом Шокли. Телефония к тому времени уже использовала электронные лампы, и Келли, руководивший отделом этих ламп, как никто другой видел их недостатки. Поэтому перед Шокли и физиком-экспериментатором Уолтером Браттейном (Walter Brattain) была поставлена задача замены ламп на нечто без стекла и вакуума. Выбор был сделан в пользу полупроводников: первым из них стал купроксный выпрямитель, в который Шокли в 1939 г. попробовал (правда, безуспешно) ввести, подобно Роберту Полю (Robert Pohl), управляющую сетку [4, 5].

Исследования были прерваны войной, во время которой Шокли совершенствовал применение глу-

бинных бомб и радаров и впервые предложил использовать ртутные трубки в линии задержки [3]. После войны поиски твердотельного электронного прибора расширились и в группу Шокли вошло уже семь физиков [2, 3]. В этот раз он решил воздействовать на новый материал — германий (Г) — на подложке (П) электростатическим полем сетки (С), влияющим, по мнению Шокли, на поток электронов от катода (К) к аноду (А) (рис. 2) [5–7]. Однако все макеты Браттейна оказались неработоспособными, и объяснил это физик-теоретик Джон Бардин (John Bardeen), создав теорию поверхностного состояния [5]. После этого Шокли, охладев к своей идее, оставил Браттейна и Бардина самостоятельно искать пути управления электронами, и в результате в декабре 1947 г. они изобрели точечный транзистор [5–8].

Это неожиданное открытие коллег было для Шокли большим разочарованием. С одной стороны, он прекрасно понимал, что изобретенное устройство не имело прямого отношения к продвигаемому им полевому эффекту. С другой стороны, получалось, что его восьмилетние усилия в этом направлении не привели к его личному триумфу [2, 3].

РИС. 1. ▶
Уильям Шокли
(1910–1989)

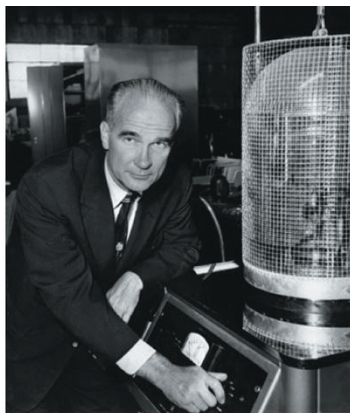
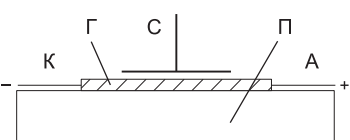


РИС. 2. ▶
Опыт Шокли



Отдалившись от группы, он в течение месяца, названного им волшебным, упорно искал объяснение случившемуся и наконец понял, что работоспособность точечного транзистора вызвана вовсе не взаимодействием электронов с поверхностью германия, а наличием *p-n*-переходов, вызывающих транзисторный эффект. Позже он подробно опишет все это в своей единственной знаменитой книге 1950 г. «Электроны и дырки в полупроводнике», ставшей библией для всех электронщиков. А тогда, в 1948 г., он сразу нашел практическое приложение своему озарению, создав плоскостной, или биполярный транзистор, быстро вытеснивший точечный и широко применяющийся до сих пор в усилительно-преобразовательной технике (рис. 3) [3, 6, 8].

Биполярный транзистор имеет два полупроводниковых слоя *n*-типа с избыточным количеством электронов *e*, подключенных к эмиттеру (*E*) и коллектору (*C*) соответственно, которые, в свою очередь, разделены слоем полупроводника *p*-типа с избыточным количеством дырок (т. е. ионов атома, лишённых одного электрона), с выводом базы (*B*) [4]. На границах слоев разного типа образуется тонкая зона (зачернена), называемая *p-n*-переходом, или обедненным слоем, лишенным заряда, поскольку свободные электроны из слоя *n*-типа свободно переходят в слой *p*-типа, закрывая имеющиеся там дырки. Эти переходы, служащие изолятором, препятствуют прохождению электрического тока между эмиттером и коллектором. Однако приложение положительного напряжения к эмиттеру относительно отрицательно заряженной базы вытягивает часть электронов *p-n*-переходов, открывая путь потоку электронов от эмиттера к коллектору. При этом коллекторный ток пропорционален базовому, т. е., в отличие от электронных ламп, биполярный транзистор управляется не напряжением, а током.

Патент на такой транзистор был оформлен Шокли в 1948 г., однако опубликован лишь после создания в 1950 г. его сотрудником Морганом Спарксом (Morgan Sparks) действующего образца [6]. Это изобретение уравнило Шокли в правах с Бардином и Браттейном, поэтому

присвоение всем им в 1956 г. Нобелевской премии было вполне справедливым. Правда, Bell Labs всегда утверждала, что Шокли является полноправным соавтором и открытия точечного транзистора, хотя Шокли болезненно реагировал на попытки поставить его третьим в списке изобретателей этого устройства [2, 3, 5]. Академик Ю. В. Гуляев, председатель Российской секции IEEE, вспоминает, как, встречая Шокли, прибывшего на конференцию в Москву в середине 1950-х гг., он обратился к почетному гостю со словами «Я горд тем, 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» [8].

Все случившееся привело к личной неприязни и уходу Бардина и Браттейна. К тому же многие отмечали отрицательные качества Шокли как руководителя: неуважение ко мнению коллег, несдержанность, подозрительность, стремление везде быть первым, что особенно проявилось при управлении собственной компанией в Пало-Альто и на заключительном этапе его жизни [2, 3, 6, 9].

Биполярный транзистор был не единственным значимым электронным элементом, изобретенным Шокли. В 1952 г. он патентовал конструкцию полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом (JFET) (рис. 4) [1, 9].

Он имеет полупроводниковый канал *n*-типа (1) с двумя электродами — исток (2) и сток (3), подключенными к батарее (БС), а также управляющий электрод, затвор в виде двух пластин *p*-типа (4) и (5), образующих два *p-n*-перехода (6) с источником управляющего напряжения (БУ). При отсутствии БУ в канале идет ток, вызванный потоком свободных электронов полупроводника *n*-типа. При отрицательном управляющем напряжении *p-n*-переходы включены в обратном направлении. При этом свободные электроны канала переходят в исток, имеющий положительный относительно затвора потенциал, создавая тем самым обедненные слои (6), которые расширяются по мере роста управля-

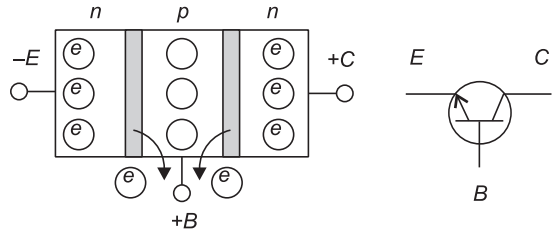


Рис. 3. ▲ Структура (слева) и обозначение (справа) биполярного *p-n-p*-транзистора

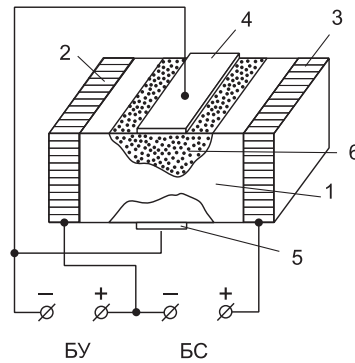


Рис. 4. ◀ Полевой транзистор Шокли

щего напряжения [4]. Это означает, что сопротивление канала увеличивается и ток падает. Однако практическая реализация полевого транзистора стала возможной лишь в 1959 г., когда Мохамед Аталла (Mohamed Atalla, выходец из Египта) и Дэвон Канг (Dawon Kahng, родом из Южной Кореи) разработали в Bell Labs технологию покрытия кремния слоем окиси кремния (SiO_2 , кварц), что позволило парировать эффект поверхностного состояния Бардина. Так был создан MOSFET-транзистор, являющийся в настоящее время основным компонентом цифровых интегральных микросхем [9].

Не менее важным изобретением Шокли был диностор (диод Шокли), задуманный для реализации замысла Келли по замене электромеханических телефонных

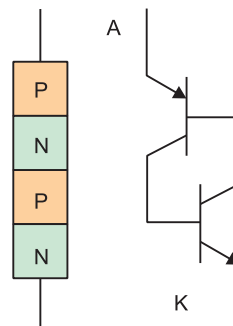
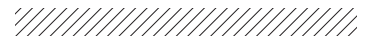


Рис. 5. ◀ Структура (слева) и схема (справа) диностора



Творческую жизнь великого ученого и изобретателя Шокли можно разделить на три периода:

- Первый период. Время, когда американские физики из Bell Labs под его руководством создали первый действующий полупроводниковый усилитель — точечный транзистор, однако фактическими изобретателями были признаны Бардин и Браттейн.
- Второй период. Вершина творчества Шокли, когда он, испытав удар по самолюбию, создал теорию *p-n*-перехода, изобрел современный биполярный транзистор, полевой транзистор, диод Шотки, выдвинул идеи тиристора и глаза робота. Этот этап завершился переездом в Калифорнию и основанием собственной компании.
- Последний период. После автомобильной аварии 1961 г. Шокли увлекся евгеникой, чем создал себе множество противников и недоброжелателей.

коммутаторов. Разработка такого электронного переключателя и была основным занятием компании Шокли в Пало-Альто в конце 1950-х гг. (рис. 5) [1–3, 10].

Динистор имеет четырехслойную структуру в виде двух *p-n-p* и *n-p-n* биполярных транзисторов, соединенных с анодом (А) и катодом (К). Поскольку в них, как отмечалось выше, коллекторный ток определяется базовым током, то динистор не пропускает ток вплоть до напряжения пробоя, создающего коллекторный ток через верхний транзистор и являющегося базовым для нижнего транзистора, что приводит к насыщению обоих транзисторов и максимальному току открытого динистора, не разрушающему, однако, *p-n*-переходы. Для выключения динистора нужно существенное уменьшение анодного напряжения. Преимуществом динистора является его высокое быстродействие и чрезвычайно низкое сопротивление при включении, что позволяет реализовать переключатели и генераторы на десятки кВ и сотни кА. По сути, динистор — это прообраз интегральных схем, предложенных вскоре Джеком Килби (Jack Kilby)

и Робертом Нойсом (Robert Noyce) [3, 6].

Следует отметить, что еще в 1950 г. Шокли высказал идею кремниевого управляемого прибора, названного тиристором, однако ее реализацией занялись другие сотрудники Bell Labs, а опытные образцы были созданы компанией General Electric лишь в 1956 г. [11].

Менее известен вклад Шокли в робототехнику. Еще в 1948 г., опираясь на свой военный опыт, он получил патент на оптическую головку самонаведения авиабомбы, в которой цель обнаруживалась сравнением ее изображения с фотографиями предварительной аэрофотосъемки [12]. Четыре года спустя он нашел гражданское применение этой идее, запатентовав «оптический глаз» робота (рис. 6).

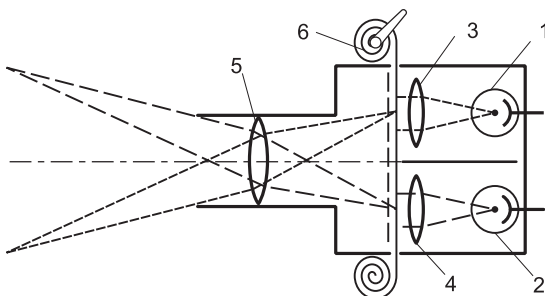
Такой «глаз» содержит два фотоэлемента (1) и (2), на которые через систему линз (3–5) направляется изображение объекта, прошедшее через прокручиваемую пленку (6) с его фотографиями, полученными посредством предварительной аэрофотосъемки. Однако реализация машинного зрения началась только в 1980-х гг.

Под впечатлением книги Норберта Винера «Кибернетика» Шокли предложил Келли создать в Bell Labs отделение обучаемых роботов, однако получил отказ. Это послужило одной из причин его увольнения и основания в 1956 г. в Пало-Альто собственной компании Shockley Semiconductor Laboratory для коммерческой реализации своих идей. В этом ему помог один из пионеров автомати-

зации, химик и бизнесмен доктор Арнольд Бекман (Arnold Beckman), который, как и Шокли, обучался в Калифорнийском университете и работал в Bell Labs [2, 3, 12]. Его привлекло обещание Шокли массового автоматизированного производства кремниевых транзисторов. Не преуспев в привлечении свои бывших коллег по Bell Labs, хорошо знавших недостатки Шокли как администратора, Шокли разыскал во всей Америке и нанял таких будущих знаменитостей, как Нойс, Гордон Мур (Gordon Moore), Жан Эрни (Jean Hoerni) и др. Однако вместо отработки технологии транзисторов Шокли все больше склонялся к научно-исследовательской работе по полемому транзистору и динистору, отчего компания не приносила никакой прибыли.

Недовольные таким положением, а также стилем руководства, восемь сотрудников компании во главе с Нойсом и Муром (позже ставшие известными как «вероломная восьмерка») вышли из нее, образовав в 1957 г. компанию Fairchild Semiconductors для отработки технологии массового производства диффузионных кремниевых транзисторов, которая вскоре стала весьма прибыльной [3]. Позднее Нойс создал здесь первую интегральную микросхему. Компания прославилась еще и тем, что многие ее ведущие специалисты впоследствии основали электронные компании, что и породило Кремниевую долину. Все они разбогатели, кроме самого Шокли [2]. В частности, Нойс и Мур в 1968 г.

РИС. 6. ▼
Глаз робота



создали знаменитую компанию Intel, ставшую вскоре ведущим производителем микропроцессоров. Таким образом, несомненно, что именно Шокли является прародителем, или «отцом» Кремниевой долины.

В 1961 г., после тяжелой автомобильной аварии, в которой они с женой и сыном чудом выжили, Шокли перешел работать профессором в Стэнфордский университет и углубился в евристику, которая объясняет все качества и свойства человека его наследственностью [2]. В частности, профессор того же университета Льюис Термен (Lewis Terman) был убежден в том, что способность к научно-технической деятельности определяется коэффициентом интеллекта IQ: тестируя студентов, он пытался выявить научных гениев и будущих нобелевских лауреатов. В последних он ошибся только дважды — с Шокли и с Луисом Альваресом (Luis Alvarez). Несмотря на это, сам Шокли широко использовал такой коэффициент при наборе сотрудников. Впоследствии он пошел еще дальше, уверовав, что у афроамериканцев

IQ статистически ниже, и поэтому призывал ограничить их рождаемость, чтобы не понижать средний IQ всего населения. В разгар кампании 1960-х гг. за права чернокожих в Америке эти теории Шокли вызвали резкое неприятие друзей и коллег, которые все больше отворачивались от него, и даже собственные дети узнали о его смерти из газет [2].

Тем не менее заслуги Шокли перед физикой и электроникой несомненны. Он автор более 90 патентов. Редко какое открытие физики так разительно меняет нашу повседневную жизнь, как это сделал транзистор. Шокли был разносторонней личностью, в частности, в разгар атомного проекта предложил разновидность атомного реактора, который был запатентован и засекречен [2, 6]. Помимо Нобелевской премии, он удостоен и других престижных наград по физике и медали почета IEEE.

Морган Спаркс, работавший бок о бок с изобретателями транзистора, отмечал: «Все они были блестящими физиками, но они были обыкновенными. Шокли был необыкновенным» [6]. ●

ЛИТЕРАТУРА

- Shockley W. B. Complete dictionary of scientific biography. Detroit: Charles Scribner's Sons. 2008. V.24.
- Shurkin J. Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age. London: Macmillan. 2006.
- Isaacson W. The Innovators: How a Group of Hackers, Geniuses, and Geeks Created the Digital Revolution. New York: Simon & Schuster. 2014.
- Микеров А. Первые полупроводниковые приборы // Control Engineering Россия. 2020. № 5 (89).
- Микеров А. Рождение точечного транзистора // Control Engineering Россия. 2020. № 6 (90).
- Lojek B. History of Semiconductor Engineering. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007.
- Łukasiak L., Jakubowski A. History of Semiconductors // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2010. № 1.
- Носов Ю. Транзистор — наше все. К истории великого открытия // Электроника НТБ. 2008. № 2.
- История транзистора, часть 3: многократное переизобретение. <https://habr.com/ru/post/449760/>.
- www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-7/shockley-diode.
- Arsov G. L., Slobodan Mircevski S. The Sixth Decade of the Thyristor // Electronics. June 2010. V. 14, № 1.
- Brock D. C. How William Shockley's Robot Dream Helped Launch Silicon Valley // IEEE Spectrum. Nov. 29. 2013.