

Если мы хотим построить науку планово, так, чтобы она являлась составной частью всего развития нашей техники, всего нашего народнохозяйственного плана, то тема, которой посвящена работа конференции, является одной из наиболее благодарных и очевидных участков этого фронта.

Если нам здесь удастся добиться решающих успехов: поставить во всесоюзном масштабе единую цельную работу, объединить средства и кадры в единый организм, то это будет важнейшим успехом советской плановой науки.

ДОКЛАД НА ВСЕСОЮЗНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР О ПРИМЕНЕНИИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

Роль, которую играет сейчас электроэнергия в вопросах автоматизации промышленности, может быть значительно усилена и расширена, потому что сейчас мы располагаем новыми и гораздо более мощными возможностями для этой цели, чем два-три года назад. Я имею в виду те возможности, которые открывает применение полупроводников в технике. Всякая автоматизация любого процесса должна состоять из нескольких основных частей. Во-первых, из приемного аппарата, от которого нужно требовать, чтобы он по возможности сам по себе не влиял на тот процесс, который на него воздействует, чтобы он сигнализировал об определенных моментах в производстве и связывал бы с этими моментами те или другие изменения в режиме. Из этого вытекает, что такой приемный аппарат должен обладать весьма высокой чувствительностью.

* Конференция проходила в Москве с 7 по 14 мая 1932 г. См.: Генеральный план электрификации СССР: Материалы Всесоюзной конференции. Т. 10, М.; Л., 1933, с. 6—10.

За этим приемным аппаратом может находиться усилительный аппарат, вызывающий далее непосредственное изменение производственного процесса.

Наиболее ответственный — первый элемент этой цепи. Полупроводники дают ценные и новые возможности для автоматизации.

Полупроводники являются чем-то средним между проводниками и непроводниками, у них есть черты, общие с теми и с другими. С проводниками они имеют то общее, что прохождение тока не сопровождается химическим разложением. Это свойство очень существенное, потому что обеспечивает неизменяемость работы данного аппарата. С непроводниками, с изоляторами они имеют то общее, что проводимость их сравнительно невелика и, самое главное, что проводимость эта очень резко меняется под действием различных факторов. Влияние температуры на металл сказывается в размере 0.3 % на 1°, а на сплавы — до 0. В изоляторах влияние температуры — 10 % на 1°. Полупроводники в этом отношении приближаются к изоляторам и дают 5—10 %, причем закон этого изменения — закон не арифметической, а геометрической прогрессии. Если на 1° изменение электропроводности выражается в 10 %, то на 5° оно будет уже составлять 100 %, на 100° — 10 000 %. Сравнительно небольшое изменение температуры не только сказывается на величине электропроводности, но изменяет даже порядок самой величины. С этим связаны и другие влияния, например термоэлектродвижущих сил, которые также больше, чем у металлов. Если в металлах, например железе-константане, 50 мкВ, то в заиси меди 1000—1200 мкВ на 1°, т. е. увеличение в 20 раз. Сюда же нужно отнести влияние действия магнитного поля, в сотни раз большее в полупроводниках, чем в металлах. Таким образом, все факторы влияют на эти полупроводники в гораздо большей степени, чем на металлы. С другой стороны, изоляторы тока не проводят и для технических целей малопригодны. Если коэффициенты мы имеем того же порядка, то величина сопротивления делает их практически бесполезными. Таким образом, в полупроводнике мы имеем весьма благоприятные для автоматизации сочетания, которых не дает ни металл, ни непроводник. Еще более важно другое свойство полупроводников. На границе большинства полупроводников с металлами создается некоторый очень тонкий промежуточный слой,

который обладает особыми свойствами. Дело в том, что толщина этого слоя, разделяющего полупроводник и металл, дает возможность электронам проходить сквозь него. Здесь мы имеем очень интересное сочетание развития теории с практической постановкой вопроса. Мы сейчас говорим об электроне не как о замкнутом шарике, ограниченном определенной поверхностью, а имеем в виду систему движения, которая определяется законами распространения света, законами волнового движения. Прежде мы говорили, что если имеется электрон, движущийся с какой-то скоростью, то запас кинетической энергии определяет ту наибольшую разность потенциалов, которую этот электрон способен преодолеть. Следовательно, если перед нами электрический барьер, т. е. противодействующая электрону разность потенциалов, которая больше, чем его кинетическая энергия, то через этот барьер он пройти не может. С новой точки зрения, электрон этому ограничению не подвержен. Каждый электрон имеет расплывающийся хвост, и если по другую сторону этого барьера находятся силы, которые дальше будут увеличивать его энергию, и если барьер представляет собой не только подъем, за которым имеется более высокий потенциал, но за ним следует дальнейшее понижение, то электрон через такой барьер может перетаскиваться этими силами. Силы, находящиеся по ту сторону этого барьера, могут протащить электрон через этот барьер. Если электрон находится частично за этим барьером, то ничего удивительного нет. Но если сочетать этот новый факт со старым представлением о шаровом маленьком электроне и спросить, какая у него кинетическая энергия в то время, когда он находится на этом барьере, то выходит, что эта энергия отрицательная, а скорость у него выйдет мнимая.

Все эти противоречия вытекают не из того, что существуют мнимые скорости, а потому, что прежнее представление об электроне неприемлемо. Чисто атомистическая картина электрона, окруженного пустотой, годилась для 1926 г., но неприемлема для объяснения целого ряда новых явлений. Данное обстоятельство играет решающую роль в свойствах полупроводников. Этот тонкий слой не представляется непроходимым. Опыт показывает, что электроны могут переходить через этот промежуточный слой из металла в полупроводник, а так как в металле электронов больше, чем в полупроводнике, то они и пере-

ходят преимущественно в полупроводник. На месте контакта из металла в полупроводник переходит больше электронов, чем обратно. Получается простейшее выпрямительное приспособление, легко воспроизводимое. Проходя через такой контакт, ток в активном направлении в несколько тысяч раз превышает ток в направлении пассивном, а более простой конструкции выпрямителя нельзя себе и представить, чем, например, медь, покрытую слоем закиси меди.

Тут же имеет место другое явление. При освещении светом всегда наблюдается поток электронов, который течет из полупроводника в металл. Поток электронов дальше идет по замкнутой цепи и может обнаруживаться измерительными приборами. Это явление было несколько лет назад обнаружено, изучено и технически применено для создания технических фотоэлементов. Их главное преимущество по сравнению с элементами вакуумного типа заключается в том, что в вакуумном элементе электроны должны выйти из металла и затратить всю работу, которая снова будет потеряна при входе во второй металл. Условия вырывания и количество вырываемых электронов определяются той работой, которую они должны совершить, и путь усовершенствования вакуумных элементов заключается в том, чтобы уменьшить эту работу. Для этого приходится покрывать металл тончайшим слоем. Это довольно сложно и технически не так легко осуществимо. Полупроводники эту задачу разрешают без всяких затруднений. У них электрон не должен выходить из данного вещества, он не успевает выйти из полупроводника, как уже входит в металл; следовательно, затрачиваемая им работа здесь меньше и в пределе она может быть как угодно мала. Фактически в случае границы между медью и закисью меди она составляет около 0,5 В, тогда как в обычных металлах она составляет 1—4,5 В, а в специальных веществах в вакууме доходит до 1 В. Токи, которые здесь получаются, измеряются миллиамперами. Новые фотоэлементы, составленные из полупроводников, имеют ряд преимуществ для технического применения.

Если представить себе вакуумный фотоэлемент, требующий очень высокого вакуума и особо специфической обработки поверхности покрытия молекулярными слоями, и сравнить его с медной проволочкой или с медной пластинкой, нагретой и опущенной в воду, то преимущество

в простоте изготовления и обращения здесь совершенно очевидно. Стоят такие фотоэлементы несколько копеек. В них есть некоторые недостатки, но они легко устранимы. Эти фотоэлементы обладают той заманчивой возможностью, что они дают ток без добавочной электродвижущей силы и могут сами по себе служить источником тока, но электродвижущая сила очень малого порядка — несколько милливольт. Это затрудняет усиление этого слабого эффекта, чтобы воздействовать на привод. Фотоэлемент, получающийся путем нагревания медной проволоки до 1050° и потом опускания ее в холодную воду, образует промежуточный слой, который эту функцию выполняет. Но такого слоя никто не делал, и нельзя ставить ему в вину, если он не является совершенно сплошным. По-видимому, этот слой не повсюду отделяет медь от закиси меди, а оставляет контакты. Эти контакты образуют те места, где ток идет обратно из металла в полупроводник. Таким образом, промежуточный слой в такой пластинке является решетом, которым мы носим воду. Отдельные капли остаются на решетке, а вся остальная вода уходит обратно. Поток электронов светом вгоняется в металл, но так как есть целый ряд контактов, то он идет обратно, и только в отдельных местах имеется преимущество потока вперед над потоками назад. Конечно, носить воду решетом — это нерациональный способ. Нужно сделать слой сплошным. Всякий способ создания сплошного слоя или выделения участков, где слоя нет, дает электродвижущую силу до 0.5 В, что достаточно для воздействия на усилители.

На данной стадии развития этого вопроса можно сказать, что фотоэлементы и выпрямители из полупроводников разрешают те минимальные требования, которые нужно ставить приемному аппарату для любого автоматического приспособления. Они очень просты, стоят несколько копеек и очень малы по своим размерам. Наконец, они без добавочной батареи и источников энергии на месте в самом аппарате дают такие токи по силе и напряжению, которые достаточны для того, чтобы воздействовать на любое реле и на любой усилитель. Исходя из этих свойств, можно найти большое и разнообразное применение для такого рода аппаратов.

При очень несложных приспособлениях эти фотоэлементы могут регистрировать целый ряд самых разнородных явлений, связанных со светом. Очень легко при-

способить их так, чтобы этот свет дифференцировал четыре-пять определенных цветов. Чувствительность их начинается в инфракрасной части. Для теплового излучения, не сопровождающегося видимым светом, порядка 500° , эти фотоэлементы могут регистрировать нагревание только тем инфракрасным светом, который при этом излучается. Можно также пользоваться для температурных измерений, для фиксации, регулировки и усиления термоэлектродвижущей силой или изменением сопротивления, изменение которого составляет 5—10 % на каждый градус.

Для электротехнических целей весьма полезное свойство полупроводников — резко менять сопротивление в магнитном поле. У нас сейчас разработан простой и удобный прибор, который позволяет очень хорошо измерять, например, магнитное поле Земли.

При полетах на аэроплане можно иметь просто компас, стрелка которого указывает направление магнитного поля. Наконец, можно пользоваться выпрямлением, которое также очень резко зависит от температуры и прекращается при 150° .

ПОЛУПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ*

Еще совсем недавно электротехника применяла, а физика изучала лишь предельные по своим электрическим свойствам материалы: хорошо проводящие металлы или непроводящие ток изоляторы.

* Статья опубликована в журнале: Природа, 1939, № 4, с. 13—19 (см. также: Электричество, 1939, № 6, с. 5).

Она написана до открытия транзисторов и до создания последовательной теории выпрямляющего действия контакта полупроводник—металл и явлений в $p-n$ переходах. В становлении этой теории существенную роль сыграли работы Д. И. Блохинцева, Б. И. Давыдова и С. И. Пекара. Упомянутые в статье исследования А. Ф. Иоффе и Я. И. Френкеля по туннельной теории выпрямления оказались, как выяснилось в конце 50-х годов, возможным приложить к описанию туннельных диодов Л. Есаки.

Предложенный в статье А. Ф. Иоффе термин «позитронная проводимость» в литературе не прижился, и вместо этого говорят о «дырочной проводимости».