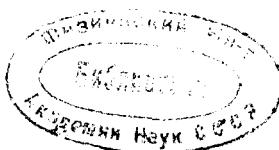


УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК



ВЕНТИЛЬНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

И. Курчатов, Ленинград

За последние 3—4 года к двум давно известным видам фотоэлектрического эффекта (внешнему и внутреннему) добавился третий — вентильный фотоэффект *. Последний происходит на границе соприкосновения двух тел. Не при всяком соприкосновении, однако, возможен вентильный фотоэффект — он возникает лишь в том случае, когда между соприкасающимися поверхностями расположен вентильный слой, затрудняющий электронный обмен между обоими входящими в контакт телами. Такой вентильный слой в некоторых случаях может быть образован очень узким зазором, толщиной в $5,10^{-8} \div 2,10^{-7}$ см. Электронный обмен через зазор затруднен, вероятность перехода электронов через него мала и очень сильно падает по мере увеличения толщины зазора — при 10^{-6} см она практически равна нулю (Френкель ¹). Вентильный слой может быть образован также слоем полупроводника; средняя длина свободного пути электрона в полупроводнике должна быть при этом меньше толщины слоя. Через вентильный слой, образованный прослойкой такого полупроводника, будут проходить, очевидно, только те электроны, длина свободного пути которых будет больше толщины слоя. В вентильном фотоэффекте электроны срываются в граничных с вентильным слоем толщах соприкасающихся тел и, проходя через слой, заряжают ту или другую (далее будет выяснено направление процесса) поверхность контакта.

* По немецкой терминологии Sperrsicht photoeffekte.

К настоящему моменту проведена уже достаточно большая работа для того, чтобы можно было объединить все исследования некоторой общей точкой зрения. Целью данного обзора явилось зафиксировать те представления, которые выкристаллизовались в процессе предыдущей работы и которые, насколько об этом мог судить автор, кладутся теперь в основу дальнейшего развития рассматриваемой области.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Хотя случаи вентильного фотоэффекта были известны уже давно (Ульянин²), но интенсивное развитие весь вопрос получил лишь после исследования Ланге³ над так называемыми купроксидными элементами. Эти элементы описаны в статье Ланге, переведенной на русский язык и помещенной в № 5 „Успехи физических наук“ за 1931 г.*. Там же есть указания на вентильный фотоэффект в сернистом свинце. В 1931 г. Бергманом⁴ были описаны селеновые, а О. В. Лосевым⁵ — карборундовые вентильные фотоэлементы.

Этот перечень включает в себя наиболее распространенные типы этого рода приборов; однако и на ряде других полупроводников воспроизводится вентильный фотоэффект, — он известен, например, для молибденита и висмутита.

Все вентильные фотоэлементы конструируются из полупроводника, на поверхность которого тем или иным способом, чаще всего катодным распылением или испарением, наносятся тонкие слои металла. Вентильный слой образуется при этом, так сказать, сам собой; только в последнее время исследователи направили усилия на учет условий образования слоя и делают попытки экспериментально контролировать его геометрическую и физическую структуру.

В случае карборундовых элементов Лосева вентильный слой образован наслоением на поверхность кристалла особого вещества, химическая природа которого пока неизвестна.

* К этой статье мы отсылаем читателей, которые бы хотели ознакомиться с конструктивным оформлением прибора.

Толщина этого наслоения варьирует от 10 до 1 μ ; наличие его на кристалле совершенно необходимо для возникновения в элементе вентильного фотоэффекта.

При освещении вентильного фотоэлемента в цепи возникает электродвижущая сила, причем по ее направлению различают элементы с фронтовым и тыловым эффектом. В элементах первого типа, к которому относятся системы с селеном и карборундом, верхний электрод 1 (рис. 1) заряжается отрицательно по отношению к нижнему электроду 2. В элементах с тыловым эффектом электрод 2 заряжается отрицательно по отношению к электроду 1. Купроксидные элементы в зависимости от способа изготовления дают тот или другой эффект. В некоторых же случаях для одних областей спектра эти элементы дают тыловой, для других — фронтовой эффект ⁶.

В настоящее время можно с полной уверенностью сказать, что, по крайней мере, в перечисленных вентильных фотоэлементах, процессы являются чисто электронными. В элементах не наблюдается никаких следов утомления даже после очень длительного (300 часов) непрерывного освещения. Электропроводность всех перечисленных выше полупроводников, создающих вентильный элемент, носит чисто электронный характер.

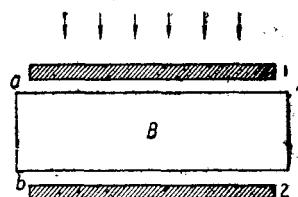


Рис. 1.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕХАНИЗМА ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭФФЕКТА

Было показано многочисленными исследованиями (Шоттки ⁷, Жузе и Наследов ⁸ и др.), что наличие сколько-нибудь значительного вентильного фотоэффекта в элементах с достаточно прозрачным проводником (Cu_2O) всегда связано с унипольярной электропроводностью системы. Кроме того известно (Курчатов и Синельников ⁹), что при таком изменении условий контакта, когда меняется направление выпрямления, меняется и знак вентильного фо-

тоэффекта: фронтовой эффеkt переходит в тыловой и обратно. Таким образом нужно признать, что условия возникновения как выпрямления, так и вентильного фотоэффекта одни и те же. Эта связь позволила Шоттки, а затем Курчатову, Синельникову и Борисову⁹ развить схему механизма тока в вентильных фотоэлементах, которая сводится к следующему. Необходимым условием существования вентильного фотоэффекта согласно этой схемы является наличие зазора между полупроводником *B* и прилегающими к нему металлическими электродами *1* и *2* (рис. 1). При падении света (сверху на рис. 1) происходит вырывание электронов в металле *1*, полупроводнике *B* и металле *2*. (В селеновых элементах, где полупроводник сильно поглощает в видимой области спектра, вырывание электронов в металле *2*, очевидно, невозможно.) Ввиду того, что падающие кванты света в металле взаимодействуют со свободными, а в полупроводнике со связанными электронами,— число освобожденных фотоэлектронов, рассчитанное на одну и ту же поглощенную энергию, оказывается различным в обоих случаях.

За последнее время появились теоретические соображения, указывающие на то, что поглощение света в металле создает меньшее число фотоэлектронов, чем в полупроводнике. Не останавливаясь ближе на этом, мы здесь ограничимся ссылкой на работы Гуддена и Поля, экспериментально показавших, что каждый поглощенный в диэлектрике или полупроводнике квант света вызывает появление одного фотоэлектрона. Вместе с тем хорошо известно, что кванты света теряют свою энергию в металле не только в процессе фотоэффекта и что число фотоэлектронов в них меньше поглощенного числа квантов.

Таким образом при освещении вентильного фотоэлемента электронный поток со стороны полупроводника в металле будет больше потока со стороны металла в полупроводник, и прилегающий к полупроводнику электрод начнет заряжаться проскочившими через вентильный слой электронами; ниже будут выяснены элементы, определяющие электрическое равновесие системы.

В том случае, если зазоры a и b (рис. 1) совершенно одинаковы и полупроводник B достаточно прозрачен, элемент при освещении не даст тока во внешней цепи, если замкнуть электроды 1—2. При освещении такого элемента лишь возникнут одной и той же величины скачки потенциала в каждом из зазоров. Если, однако, полупроводник не прозрачен, будет заряжаться лишь верхний электрод, в системе возникнет ток, отвечающий фронтовому эффекту. С развитой здесь точки зрения очевидно, что в элементах с достаточно прозрачным полупроводником наличие зазоров еще не обеспечит тока при освещении: необходимо требовать для возникновения тока в цепи асимметрии зазоров у электродов. Асимметрия зазоров у полупроводника, зажатого между металлическими электродами, приводит к униполярной проводимости элемента, чем и обусловлена указанная выше связь выпрямления и вентильного фотоэффекта в купроксидных элементах.

Современные представления о механизме выпрямления электронноопроводящих систем собраны и развиты в работе Иоффе и Френкеля¹⁰. Пользуясь этой работой, легко определить, не прибегая к другим методам, наличие зазора у того или другого электрода элемента по направлению выпрямления системы. Исходя из того, что распределение электронов по энергиям в полупроводнике подчиняется статистике Больцмана, а в металле статистике Ферми, Иоффе и Френкель показали, что больший ток через зазор будет всегда проходить в том случае, когда электроны движутся со стороны металла в полупроводник. Таким образом в том случае, если (рис. 1) больший ток проходит при отрицательном потенциале 2 по отношению к 1, можно утверждать, что и зазор лежит у электрода 2; при освещении этот электрод будет заряжаться отрицательно в процессе вентильного фотоэффекта — мы получим вентильный фотоэлемент с тыловым эффектом. При другом направлении элемент будет давать фронтовой эффект в связи с тем, что зазор окажется в этом случае у электрода 1. Таким образом легко объясняется установленный на опыте и — долго казавшийся загадочным факт, что в купроксид-

ном элементе электрод, с которого легко уходят электроны при выпрямлении, сам заряжается отрицательно в процессе вентильного фотоэффекта. Развитые соображения легко позволяют объяснить описанную ранее инверсию фотоэффекта при освещении элемента светом различной длины волны, если учесть спектральное распределение поглощения света полупроводником.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Согласно изложенной схемы очевидно, что в вентильном фотоэффекте принимают участие те же самые электроны, что и при изменении сопротивления полупроводника под дей-

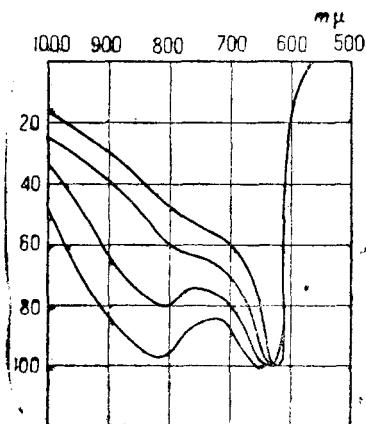


Рис. 2.

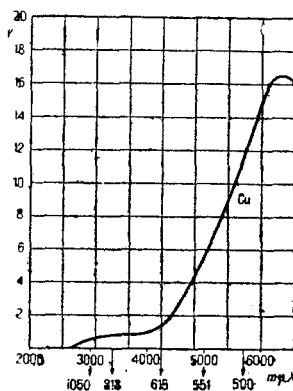


Рис. 3.

ствием света в процессе внутреннего фотоэффекта. Нужно поэтому думать, что только полупроводники, в которых в заданной области спектра происходит внутренний фотоэффект, пригодны для устройства вентильных фотоэлементов. Кроме того, можно ожидать совпадения между спектральным распределением чувствительности вентильного фотоэлемента и эффекта изменения сопротивления полупровод-

ника под действием света, по крайней мере в удаленных от границы чувствительности областях спектра.

Оба заключения целиком подтверждаются на опыте. Полупроводники всех существующих вентильных фотоэлементов обладают внутренним фотоэффектом, спектральные распределения чувствительности обоих эффектов совпадают друг с другом. Измерения чувствительности вентильных фотоэлементов с полупроводником из Cu_2O для тылового эффекта произведены Ланге¹¹, для фронтового — автором и Синельниковым⁶ и даны соответственно на рис. 2 и 3. В обоих случаях по оси ординат отложены силы тока в фотоэлементе, замкнутом на гальванометр с малым сопротивлением (в цепь не включалась посторонняя электродвигущая сила). Силы тока на рис. 2 и 3 отнесены к спектру постоянной энергии. Эффект изменения сопротивления Cu_2O под действием света различной длины волн был измерен в свое время Пфундом¹². Его данные также для спектра постоянной энергии представлены на рис. 4. Кривая I относится к прямому падению света, кривая II снята от источника, свет которого проходил через слой того же Cu_2O . У Ланге в опытах с тыловым эффектом необходимо сопоставлять данные кривой с II, у автора и Синельникова — с кривой I. Как видно из сопоставления приведенных данных, между спектральным распределением интенсивности вентильного и внутреннего фотоэффекта обнаруживается тот параллелизм, который был постулирован выше. Этот параллелизм, однако, должен наблюдаться только в областях спектра, достаточно удаленных от границы действия вентильных фотоэлементов. Сорванные в процессе внутреннего эффекта электроны, проходя через вентильный слой, должны затрачивать работу; таким образом спектральная граница вентильного фотоэффекта должна быть смещена в сторону коротких волн по отношению к спектральной границе внутреннего фотоэффекта. Такой сдвиг

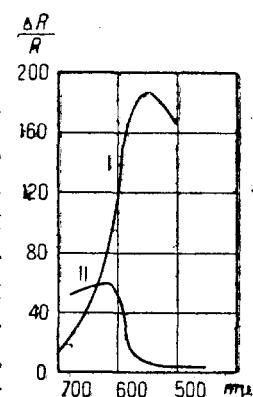


Рис. 4.

экспериментально был обнаружен автором, Синельниковым и Борисовым⁹ для вентильных фотоэлементов с Cu_2O и селеном. Для Cu_2O предельная длина волны света, еще вызывающая внутренний фотозеффефкт, на основании данных работ Фохта¹³, указанными исследователями была принята равной 4000 м μ . Граница же чувствительности соответствующих вентильных фотоэлементов лежит при 1400 м μ . Работа, теряемая электроном при прохождении через вентильный слой, таким образом, равна $\sim 0,5$ V. Для селена непосредственно на опыте были определены границы того и другого эффефекта (рис.5). Кривая 1 представляет эффефект изменения сопротивления под действием света, кривая 2 — интенсивность вентильного фотозеффефекта в селеновом элементе с полупрозрачным серебряным, кривая 3 — с золотыми электродами. Работа перехода здесь также равна $\sim 0,5$ V. В зависимости от способа приготовления пластин граница вентильного фотозеффефекта немного смещается в ту или другую сторону, причем работа перехода варьирует в опытах от 0,6 до 0,4 V. Влияние материала электрода на границу в опытах обнаружено не было.

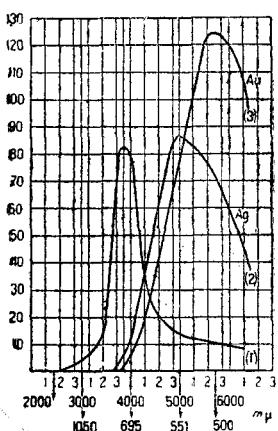


Рис. 5.

Мы заканчиваем этот параграф изложением приведенного материала, хотя им и не ограничиваются опытные данные подкрепляющие нашу теоретическую схему; наоборот, содержание следующих параграфов сводится к тому же экспериментальному описанию дальнейших сторон схемы. Нам кажется, однако, что без приведенных опытов со спектральным распределением интенсивности обоих эффефектов весь остальной, достаточно обширный, экспериментальный материал все же не дал бы возможности создать отчетливое представление о механизме вентильного эффефекта.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ В ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТАХ

Эквивалентная схема фотоэлемента может быть дана в том виде, как это указано на рис. 6. Вентильный фотоэлемент представляет собой источник тока (сплошные стрелки), который распределяется затем в схеме; замыкаясь через R_1 и R_2 — сопротивление полупроводника и внешней цепи и через R_3 — сопротивление, не подчиняющееся закону Ома и характеризующее отток электронов (пунктирные стрелки) с металлического электрода обратно в толщу полупроводника. Природа этого оттока сейчас еще не может считаться окончательно установленной. Вообще говоря, можно думать, что отток слагается из электронного потока через вентильный слой и „вихревых коротких замыканий“ через те точки соприкосновения металла и полупроводника, где осуществляется полный контакт (рис. 7). Пользуясь схемой, рассмотрим прежде всего зависимость напряжения разомкнутого фотоэлемента от интенсивности и длины волны падающего света. В случае вакуумного фотоэлемента в равновесной электрической системе электродвижущая сила разомкнутого фотоэлемента не зависит от интенсивности света и определяется из уравнения

$$V = \frac{h\nu - P}{e}. \quad (1)$$

В вентильном фотоэлементе из-за оттока электронов с электрода 1 (рис. 6) электродвижущая сила не будет достигать значений, требуемых квантовым законом (1), и будет зависеть от интенсивности падающего света. Ауэрс и Кершбаум¹⁴ впервые подробно разработали этот вопрос.

Из измерений над прохождением тока в темном вентильном фотоэлементе, который в то же время, как мы знаем,

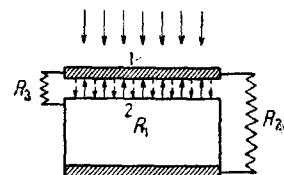


Рис. 6.



Рис. 7.

является и выпрямителем, известно, что зависимость силы тока через него от напряжения при отрицательном заряде электрода 1 (рис. 6) может быть представлена кривой рис. 8.

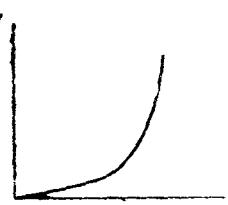


Рис. 8.

Ток через темный выпрямитель будет, очевидно, представлять собой отток электронов в работающем на свету фотоэлементе. Таким образом по мере увеличения интенсивности падающего света при растущем линейно с ней токе с 2 на пластину 1, отток с пластины 1 в полупроводник будет расти быстрее, чем по линейному закону, и электродвижущая

сила разомкнутого элемента в зависимости от интенсивности падающего света даст кривую, имеющую характер насыщения. Этого рода зависимость многократно изучалась различными исследователями. Рис. 9, заимствованный из работы Кракау-Лепешинской¹⁵, хорошо иллюстрирует теоретические соотношения. Данные относятся к вентильному фотоэлементу с Cu_2O и заняты для тылового эффекта (кривая E_ϕ). Из схемы рис. 6 очевидно, что ток в короткозамкнутом элементе должен расти линейно с силой света, так как разность потенциалов между 1 и 2 будет при этом еще настолько незначительна, что отток с 1 на 2 еще будет расти линейно с напряжением. Эта зависимость была тщательно прослежена Ауэрсом и Кершбаумом¹⁴, а также Кракау-Лепешинской (кривая I_ϕ на рис. 9). Рассматриваемая эквивалент-

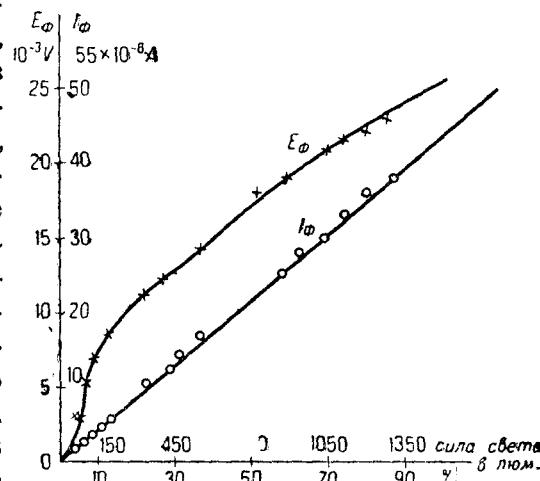


Рис. 9.

сти линейно с силой света, так как разность потенциалов между 1 и 2 будет при этом еще настолько незначительна, что отток с 1 на 2 еще будет расти линейно с напряжением. Эта зависимость была тщательно прослежена Ауэрсом и Кершбаумом¹⁴, а также Кракау-Лепешинской (кривая I_ϕ на рис. 9). Рассматриваемая эквивалент-

ная схема позволяет просто проанализировать довольно сложную картину температурной зависимости ряда характеристик вентильных фотоэлементов^{16, 17}. Не входя здесь в подробное изложение всего собранного материала, мы считаем не лишним разобрать вопрос о зависимости силы тока в вентильном фотоэлементе от температуры при неизменной интенсивности падающего света и различных внешних сопротивлениях цепи. Эта зависимость для фронтового эффекта в элементах с Cu_2O представлена на рис. 10⁶. При понижении температуры наблюдается вначале рост тока с последующим его спадом. При разборе этого хода тока следует иметь в виду, что электронный фототок, по крайней мере в первом приближении, не зависит от температуры. Рост тока при понижении температуры вызван увеличением сопротивления R_3 для оттока электронов с 1 на 2; из опытов по выпрямлению в темном элементе известно, что ток через зазор уменьшается при понижении температуры. Таким образом при понижении температуры большая часть первичного фототока отвечается во внешнюю цепь. Чем меньше сопротивление внешней цепи, тем меньшую

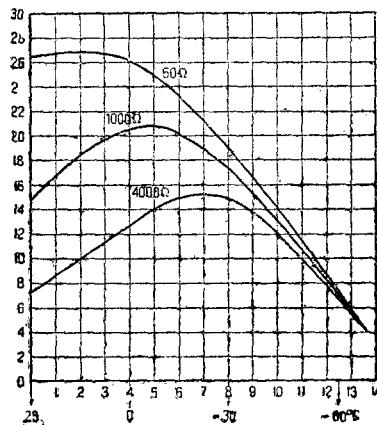


Рис. 10.

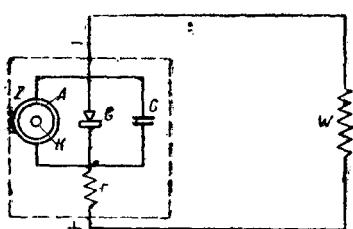


Рис. 11.

роль играют отвечающиеся в сопротивление R_3 токи, и зависимость от температуры оказывается более пологой, что отчетливо и видно на рис. 10. Уменьшение тока при дальнейшем понижении температуры связано с ростом внутреннего сопротивления R_1 полупроводника; ток в цепи почти перестает зависеть от внешнего сопротивления R_2 .

Заканчивая рассмотрение эквивалентной схемы, нужно указать на интересную попытку Кёроша и Зелени¹⁸ сконструировать физическую модель вентильного фотоэлемента. В эту модель включены вакуумный фотоэлемент, детектор и ряд сопротивлений. Схема модели, представленная на рис. 11, не нуждается в особом пояснении.

На модели и селеновом вентильном фотоэлементе были проведены сравнительные измерения ряда характеристик. На рис. 12 дана зависимость между силой света (ось аб-

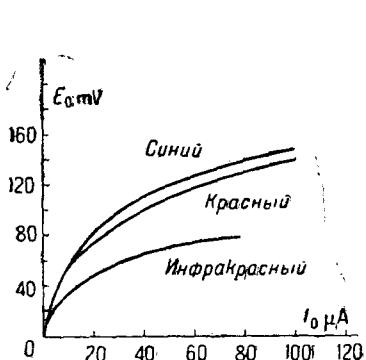


Рис. 12.

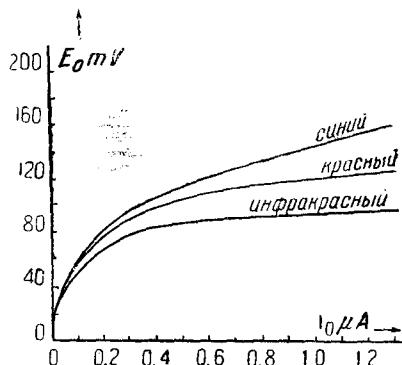


Рис. 13.

циссе) и напряжением разомкнутого селенового фотоэлемента для разных областей спектра, на рис. 13 та же зависимость дана для модели. В обоих случаях по оси абсцисс отнесена не непосредственно сила света, а пропорциональная ей величина тока в коротко-замкнутой цепи. Как видно, не только характер, но и численные значения напряжений в обоих случаях одни и те же, — настолько удачно подобраны константы схемы. Модель была использована для определения той работы, которая может быть получена из элемента при различной интенсивности падающего света в зависимости от внешнего сопротивления. Работа при заданной силе света зависит от величины внешнего сопротивления, давая максимальные величины для некоторых определенных его значений. При больших интенсивностях освещения это оптимальное сопротивление меньше, чем при слабых, что связано с наличием в модели детектора, а в вен-

тильном фотоэлементе — токов „вихревых замыканий“ и электронной диффузии с металла в полупроводник. Измененная на опыте энергия во внешней цепи в зависимости от внешнего сопротивления и интенсивности освещения представлена в логарифмических координатах на рис. 14.

5. ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕНТИЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДОБАВОЧНОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЕ В ЦЕПИ

Изучение электрических характеристик освещенного вентильного фотоэлемента при наличии в цепи добавочной электродвижущей силы производилось многими исследователями. Но нужно сказать, что только О. В. Лосевым⁵ получены результаты, допускающие простую физическую интерпретацию. Результаты других авторов сохраняют к данному моменту ценность только как феноменологическая характеристика вентильных приборов того или другого типа. Из этого рода исследований самым обстоятельным следует считать работу В. Н. Кракау-Лепешинской¹⁵ над тыловым эффектом в купроксидных элементах, изготовленных Центральной радиолабораторией. Здесь мы считаем не лишним достаточно подробно изложить методику и результаты работ В. Н. Кракау-Лепешинской с целью дать представление о порядке величин напряжения и токов в освещенном элементе. Производство указанных элементов стандартизовано в руководимой Б. А. Остроумовым лаборатории ЦРЛ, и приводимые ниже данные, таким образом, характеризуют приборы, свойства которых твердо обеспечены учетом экспериментальных условий их изготовления. Нужно сказать, что купроксидные вентильные фотоэлементы ЦРЛ далеко не дают максимальных значений тока и напряжения этого рода приборов, которые теми или иными

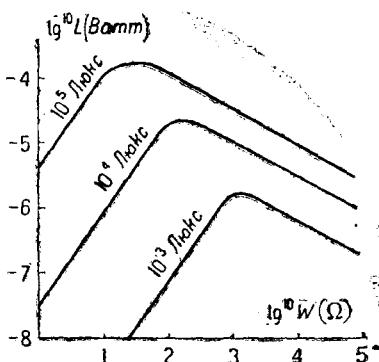


Рис. 14.

исследователями были зафиксированы на опыте, и в ряде случаев дают значения в десятки раз превосходящие значения для фотоэлементов ЦРЛ. Интерес к элементам ЦРЛ, однако, сейчас еще остается очень большим постольку, поскольку другим исследователям не удается выяснить условия, обеспечивающие большие и устойчивые от одного

к другому прибору значения соответствующих характеристик элемента.

Купроксидные вентильные фотоэлементы ЦРЛ конструируются в виде палочек длиной 50 м.м и диаметром 2 м.м. Для устранения возможных последующих изменений палочки помещаются в эвакуированные стеклянные трубы. В описываемых ниже опытах освещение производилось белым светом от пойнтоловой лампы, свет которой, прошедший через тепловой фильтр, фокусировался на поверхности фотоэлемента. Измерение фотоэлектродвижущей силы и фототока при включении элемента в цепь с посторонним источником э. д. с. производилось в компенсационной схеме, приведенной на рис. 15. Под фототоком и фотоэлектродвижущей силой элемента, включенного в цепь внешней э. д. с., будем в дальнейшем понимать разности э. д. с. и силы тока, определенными в компенсационной схеме для освещенного и темного фотоэлемента. Кроме того, условимся называть направление посторонней э. д. с. положительным, когда она направлена навстречу э. д. с. вентильного фотоэлемента. На рис. 16, 17, 18, 19 и 20 представлены результаты измерений. На рис. 16 дана зависимость фототока и фотоэлектродвижущей силы от внешнего приложенного напряжения для светового потока в 38 люменов. Прежде всего следует отметить, что как фототок, так и фотоэлектродвижущая сила при некотором внешнем положительном

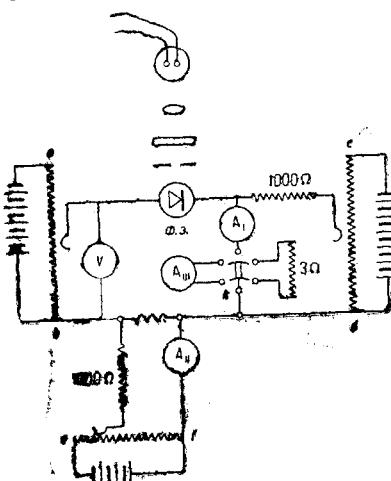


Рис. 15.

сировался на поверхности фотоэлемента. Измерение фотоэлектродвижущей силы и фототока при включении элемента в цепь с посторонним источником э. д. с. производилось в компенсационной схеме, приведенной на рис. 15. Под фототоком и фотоэлектродвижущей силой элемента, включенного в цепь внешней э. д. с., будем в дальнейшем понимать разности э. д. с. и силы тока, определенными в компенсационной схеме для освещенного и темного фотоэлемента. Кроме того, условимся называть направление посторонней э. д. с. положительным, когда она направлена навстречу э. д. с. вентильного фотоэлемента. На рис. 16, 17, 18, 19 и 20 представлены результаты измерений. На рис. 16 дана зависимость фототока и фотоэлектродвижущей силы от внешнего приложенного напряжения для светового потока в 38 люменов. Прежде всего следует отметить, что как фототок, так и фотоэлектродвижущая сила при некотором внешнем положительном

напряжении меняет свой знак. Как было выяснено, величина этого напряжения не зависит от силы света и остается неизменной в пределах $0,095 \pm 0,1$ V для всех образцов.

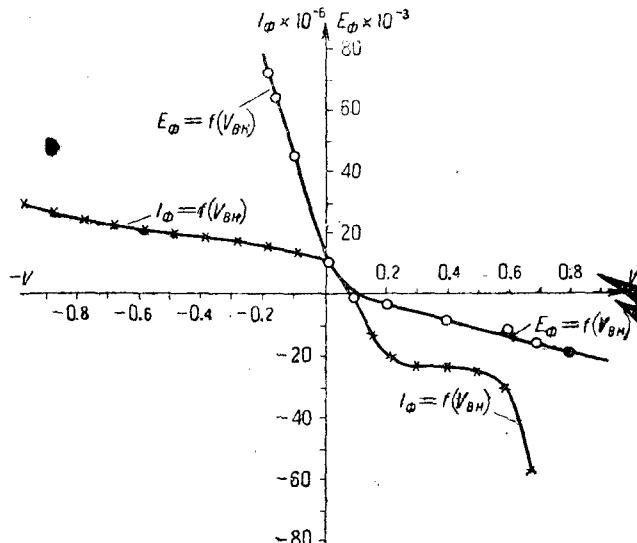


Рис. 16.

Этот замечательный результат не получил еще в данный момент своего объяснения. На рис. 17 дана зависимость

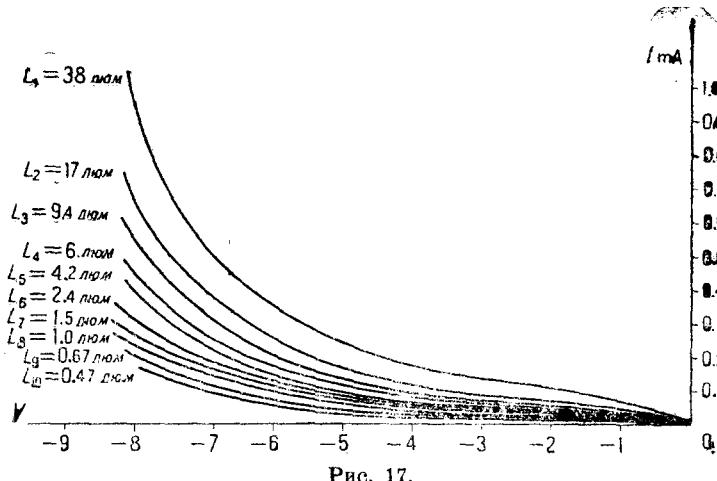


Рис. 17.

фототока от величины внешнего отрицательного напряжения для величины потока, указанного на каждой из кри-

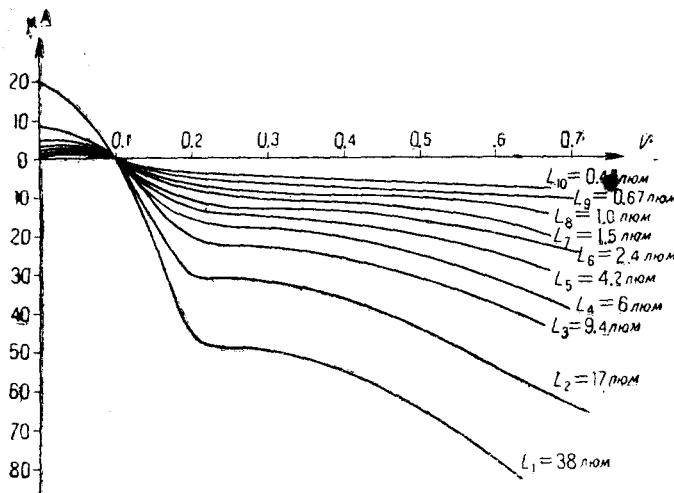


Рис. 18.

вых. На рис. 18 та же зависимость дана для внешнего положительного напряжения. Наконец, на рис. 19 и 20 дана

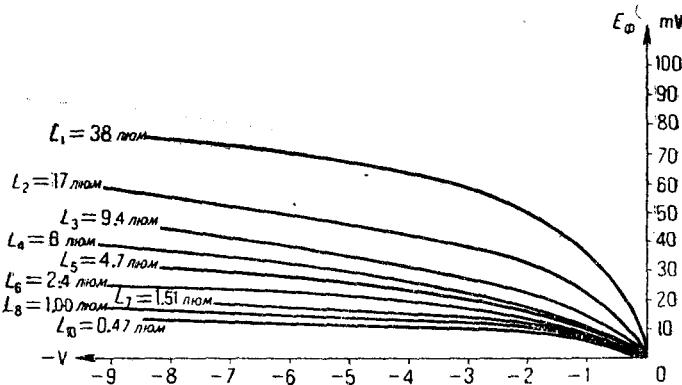


Рис. 19.

зависимость фотоэлектродвижущей силы от внешнего отрицательного (соответственно положительного) напряжения при разных потоках падающего на фотоэлемент света.

Трудность физической интерпретации полученных данных сводится к тому, что на изменение вентильного фотоэффекта в электрическом поле, образуемом в вентильном слое добавочной э. д. с., накладываются токи через полупроводник. Исключить это влияние, измерив токи через элемент в темноте, не представляется возможным, так как

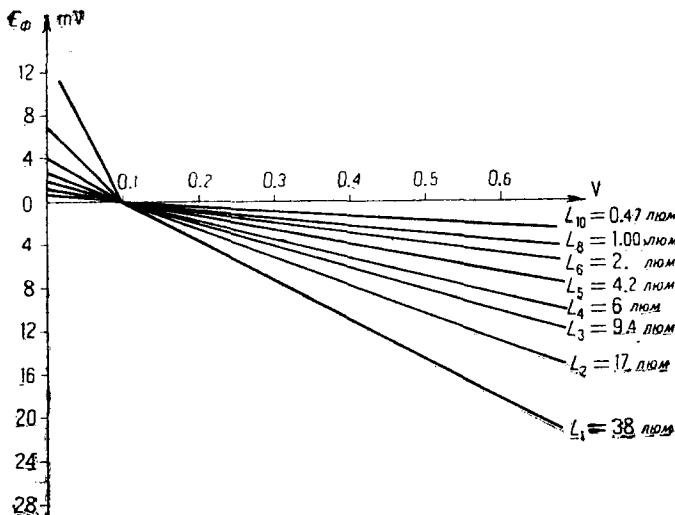


Рис. 20.

при освещении элемента из-за внутреннего фотоэффекта электропроводность полупроводника меняется.

В карборундовых вентильных фотоэлементах, по всей вероятности, благодаря сильному поглощению света, это искажающее влияние внутреннего фотоэффекта мало сказывается на чистоте получающейся картины, по крайней мере, если судить об этом по ясности теоретических выводов, которые могут быть сделаны из опыта.

На рис. 21 дана зависимость силы тока в цепи от электродвижущей силы для освещенного L и не освещенного A контакта стального остряя на карборунде с активным слоем (Лосев). Замечательно в этих кривых: 1) наличие тока насыщения для напряжений, вытягивающих электроны из кристалла, — кривая L в левой части рисунка идет парал-

лельно кривой A ; 2) одинаковость тока в темном и освещенном фотоэлементе для напряжения другого знака, что сигнализирует о полном отсутствии в опыте искажающего влияния внутреннего фотоэффекта; 3) возникновение э. д. с. в вентильном фотоэлементе порядка целых вольт; как видно из рис. 21, ток обращается в нуль при встречной э. д. с. в 3,4 V. Освещение контакта в этих опытах производилось 2-амперной вольтовой дугой через стеклянный светофильтр, не пропускающий заметно лучей с длинами волн, меньшими 3300 \AA . Кванты этой длины волны несут с собой энергию в 3,73 V; найденные на опыте 3,4 V таким образом указывают на возможность перевести в вентильном фото-эффекте 90% световой энергии кванта в электрическую. Толщина активного слоя карборунда была 0. В Лосевым определена для данного кристалла и оказалась равной 1 μ . Необходимо

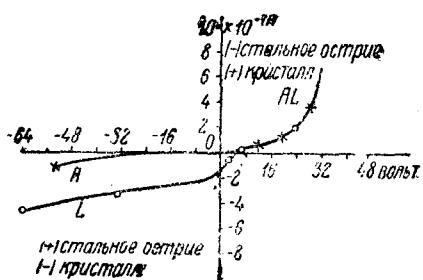


Рис. 21.

из этих опытов, а также из некоторых других изысканий того же автора, принять, что внутри полупроводника электрон без особой потери энергии может проходить пути порядка $10^{-4} \div 10^{-5}$ см. Ниже мы увидим, что почти к тем же заключениям совсем по другим и, нужно сказать, не столь убедительным основаниям приходят Шоттки и Гудден.

При увеличении толщины активного слоя уменьшается э. д. с. вентильного карборундового фотоэлемента; при 11 μ она равна всего 0,03 V, при 3 μ — около 0,7 V для той же интенсивности освещения, что и в данных рис. 21. К сожалению, в исследовании не был определен квантовый выход фотоэффекта, и, таким образом, нельзя составить суждения об энергетических свойствах карборундовых элементов с активным слоем.

гии в 3,73 V; найденные на опыте 3,4 V таким образом указывают на возможность перевести в вентильном фото-эффекте 90% световой энергии кванта в электрическую. Толщина активного слоя карборунда была 0. В Лосевым определена для данного кристалла и оказалась равной 1 μ . Необходимо

6. ВЕНТИЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Измерения с поляризованным светом производились Ланге, Наследовым, Жузе, автором и Синельниковым и другими, но только Бергман¹⁹ получил положительные результаты, поставив опыты в чистых условиях с поверхностью полупроводника, которую бы можно было рассматривать как плоскую. Его измерения сделаны с селеновым вентильным фотоэлементом. Сила фототока в зависимости от угла падения представлена сплошными линиями на рис. 22 для света, поляризованного параллельно и перпендикулярно плоскости падения.

Получившуюся

разницу Бергман объяснил, пользуясь формулами Друде для амплитуды преломленного луча при разных углах падения и разных состояниях поляризации луча. Вычисленный, в предположении пропорциональности количеству попавшей в тело световой энергии, по формулам Друде ток показан пунктирными линиями на рис. 22. В формулы были подставлены значения коэффициента преломления и поглощении селена для длины волны 6150 \AA (при которой производились измерения), соответственно равные 3,2 и 0,25. Значения коэффициента преломления были взяты по табличным данным; значения же коэффициента поглощения были подобраны так, чтобы наилучшим образом удовлетворять опытам, и не совпадают с данными других авторов, которые для данной модификации селена находят значение в 0,58. Можно думать, что это расхождение, как и некоторое не-

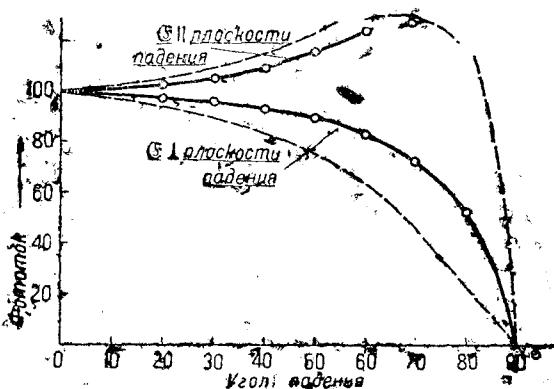


Рис. 22.

согласие рассчитанных и измеренных данных, связано, в первую очередь, с трудностями выделения в процессе изготовления селеновых элементов определенной модификации этого полупроводника.

7. Квантовый выход в вентильных фотоэлементах

Одним из очень существенных вопросов, связанных с процессами в вентильных фотоэлементах, является вопрос о квантовом выходе, т. е. о числе попадающих на электрод

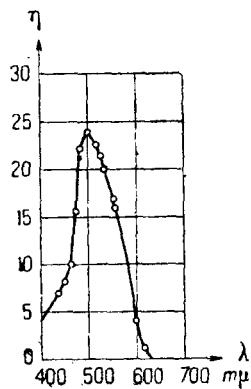


Рис. 23.

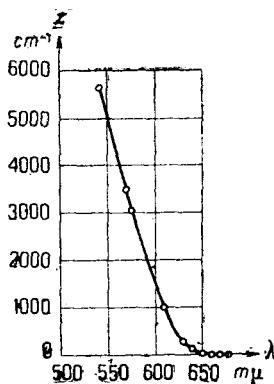


Рис. 24.

электронов, рассчитанном на один квант падающего света. Величина этого выхода естественно зависит от длины падающего света; распределение квантового выхода η по спектру определено Вайбелем* для случая фронтового эффекта в купроксидных элементах; оно представлено на рис. 23. По оси ординат дано η в процентах от числа электронов на один падающий световой квант. Максимальный выход по этим данным достигает 25%, но в отдельных случаях наблюдались и большие величины — до 50%, дававшие до 1 кул. на каждую *cal*. Ход кривой η может быть объяснен по ходу коэффициента поглощения Cu_2O . На рис. 24

* Приведенные данные были сообщены Шоттки²⁰ в его обзорном докладе на съезде в Вад-Эльстере; оригинальная работа Вайбеля до сих пор еще не напечатана.

дана зависимость коэффициента поглощения χ см длины волны. В области $6500 \div 5500 \text{ \AA}$ рост коэффициента поглощения сопровождается ростом квантового выхода. Чем больше поглощение, тем большая часть срываемых светом электронов находится в непосредственной близости к вентильному слою, тем большему числу их удается достигнуть электрода. Значения η и χ позволяют вычислить толщину слоя, которую могут пройти сорванные светом электроны внутри тела. Эти расчеты показывают, что столь большие квантовые выходы при относительно небольших поглощении можно объяснить только при допущении, что электроны, сорванные светом на расстоянии в 10^{-4} см от поверхности, еще могут выйти из полупроводника в вентильный слой.

Этот факт, по мнению Шоттки, является одним из самых существенных моментов в рассматриваемой области фотоэффекта. До сих пор было принято думать, что длина свободного пути электрона, как в проводнике, так и в полупроводнике имеет порядок 10^{-6} см. Но при этих допущениях квантовый выход в вентильных фотоэлементах не мог бы превосходить 1%. Таким образом необходимо принять, что фотоэлектроны в полупроводнике даже после очень большого числа столкновений не теряют на цело своей энергии и еще способны проникнуть в вентильный слой.

Эти очень интересные соображения получают теперь после работ Гуддена и Поля, а особенно Гехта * некоторую экспериментальную базу. Опыты Гехта были произведены на кристаллах AgCl , обладающих после рентгенизации внутренним фотоэффектом. Хорошо изолирующий, находящийся в темноте под напряжением, кристалл на короткое и вполне определенное время освещался узким световым пучком на разных расстояниях от анода. Протекающие в цепи при освещении количества электричества измерялись электрометром. На рис. 25 представлены результаты измерений, причем по оси абсцисс отложено расстояние пучка от

* Работа еще не опубликована, данные взяты из сообщения Гуддена ²¹ на съезде в Вад-Эльстере.

анода, по оси ординат — измеренные количества электричества, параметром выбрана сила поля в кристалле. Пусть в кристалле в месте попадания пучка образуются электроны (рис. 26). Под действием приложенного электрического поля они будут перемещаться к аноду, и заряд, который будет зафиксирован на электроде, окажется равным $en \frac{a}{d}$, где e — заряд электрона, n — число электронов, a — путь, который пройдут электроны в теле без прилипания, а d — расстояние между электронами. Если бы a было величиной большей любой x , то отодвигая пучок от анода, мы бы наблюдали линейную зависимость между количеством электричества, измеряемым электрометром и расстоянием пучка от анода. Электроны

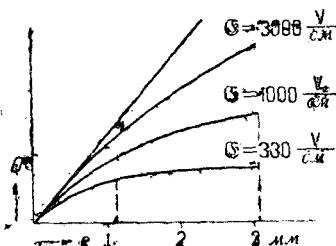


Рис. 25.

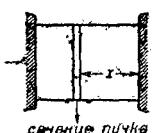


Рис. 26.

проходили бы при всяком положении

светового пучка путь x . Если бы, наоборот, a было много меньше x , заряд электрометра не зависел бы от расстояния пучка от анода. Опыт дал, как видно из рис. 25, картину, не совпадающую с разобранными предельными случаями. При небольших расстояниях пучка от анода заряд электрометра растет линейно с расстоянием, электроны проходят весь путь от места их образования до электрода. При больших расстояниях заряд не зависит от расстояния, электроны прилипают к элементам решетки, двигаясь от места срыва до анода и проходя некоторый путь l , отмеченный пунктиром на рис. 25 и зависящий от силы поля в кристалле. Из рассмотрения рис. 25 видно, что длина того пути, который электрон без прилипания проходит в кристалле, зависит от силы поля в нем и даже в небольших полях с градиентом в 300 V/cm достигает величины порядка миллиметров.

Эти работы школы Поля в связи с соображениями Шоттки приобретают очень большой интерес, значительно

меняя обычные представления о поведении электронов в гетерополярных кристаллах и полупроводниках.

Данные для квантового выхода, полученные Вайбелеем, позволяют ориентировочно определить коэффициент полезного действия существующих вентильных фотоэлементов как приборов, трансформирующих световую энергию в электрическую. В качестве предельно большой величины этого коэффициента можно указать значение в 20%, исходя из максимального выхода, наблюденного Вайбелеем, и больших электродвижущих сил, обнаруженных Лосевым. Эта цифра, правда, может оказаться сильно преувеличенной, так как одни из измерений относятся к элементу с Cu_2O , другие же к карборундовому элементу. Гораздо более вероятным коэффициентом полезного действия нужно считать 2%. На вентильных купроксидных элементах, изготавляемых в некоторых лабораториях Союза, по сведениям автора для фронтового эффекта наблюдались э. д. с. в 1 V при освещении светом с энергией квант до 3 V; это значение э. д. с. при выходе в 25% и даст указанный выше коэффициент полезного действия. Оба приведенные значения относятся к исключительным элементам; в распространенных моделях этого типа приборов коэффициент полезного действия не превосходит (0,005 — 0,01%).

Автор считал лишним в данном обзоре останавливаться на тех применениях, которые уже нашли себе — пока, главным образом, в лабораторной технике — вентильные фотоэлементы, так как этот вопрос получил уже достаточное освещение на страницах „Журнала технической физики“^{32,33}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Frenkel, Phys. Rev. 36, 1604, 1930.
2. Uljanin, Wied. Ann. 36, 241, 1888.
3. Lange, Phys. ZS. 31, 139 и 964, 1930.
4. Bergmann, Phys. ZS. 32, 286, 1931.
5. Лосев, Журн. техн. физ. 1, 718, 1931.
6. Kourtschatov I. und Sinelnikov K., Phys. ZS. der Sowjetunion 1, 23, 1932.
7. Schottky und Duhme, Naturwissenschaft. 18, 736, 1930.

8. Жузе и Наследов, Журн. техн. физ., 1, 694, 1931.
9. Kurtschatov, Sinehnikov und Borisov, Phys. ZS. der Sovjetunion 1, 42, 1932.
10. Ioffe und Frenkel, Phys. ZS. der Sovjetunion 1, 60, 1932.
11. Lange, Naturwissenschaft. 23/25, 525, 1931.
12. Pfund, Phys. Rev. (2) 7, 239, 1916.
13. Voigt, Ann. der Phys. 7, 1189, 1930.
14. Auwers und Kerschbaum, Ann. d. Phys. 72, 131, 1930.
15. Кракау-Лепешинская, Вест. Электротехники, 11—12, 399, 1931.
16. Teichmann, ZS. Phys. 65, 709, 1930; 67, 192, 1931.
17. Lange, Phys. ZS. 32, 850, 1931.
18. Körösy und Seleny, Phys. ZS. 32, 847, 1931.
19. Bergmann, Phys. ZS. 33, 17, 1932.
20. Schottky, Phys. ZS. 32, 833, 1931.
21. Gudden, Phys. ZS. 32, 825, 1931.
22. Остроумов Б. А., Журн. техн. физ. 1, 376, 1931.
23. Журн. техн. физ. 1, вып. 7, посвященный Конференции по венчильным фотодиодам и выпрямителям.

