ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

С. Ю. Лукьянов и *А. А. Равдель, Ленинград*

Фотоэлектрические приборы, давно уже применяемые при физических исследованиях, все шире используются в различных областях техники.

Действие этих приборов может быть основано на:

a) внешнем фотоэффекте,

b) внутреннем фотоэффекте,

c) фотоэффекте запирающего слоя (Sperrschichtphotoeffekt).

Приборы, основанные на последних двух явлениях, сравнительно мало применяются в технике; это отчасти связано с недостаточно полным исследованием этих явлений. Кроме того, имеющиеся технические образцы обладают некоторыми органическими недостатками, ограничивающими область их применения. К этим недостаткам относится, главным образом, невозможность использования их при высоких частотах. Даже при обычных звуковых частотах (порядка 1000 Hz) наблюдается заметная инерция. Кроме того, малое внутреннее сопротивление сильно затрудняет последующее усиление фототоков, получаемых в фотоэлементах этих типов. Поэтому в дальнейшем мы остановимся на фотоэлементах и других приборах, основанных на внешнем фотоэффекте.

В конструктивном отношении и в зависимости от предъявляемых требований фотоэлектрические приборы, основанные на внешнем фотоэффекте, могут быть разбиты на четыре группы:

1) собственно фотоэлементы,

2) фотореле,

3) телевизионные приборы,

4) фотоэлектрические приборы со вторичной эмиссией (фотодинаторы).

Нет возможности перечислять здесь всевозможные применения фотоэлементов в науке и технике. Можно сказать, что фотоэлемент, не так давно применявшийся в научных лабораториях, прошел тот же путь, что и электронная лампа, и стал столь же распространенным техническим прибором. Достаточно указать на звуковое кино, некоторые области телемеханики и объективную фотометрию. В телевидении, несмотря на появление в последние годы специальных приборов, фотоэлементы продолжают играть большую роль во всех системах механического телевидения.

Для некоторых целей, где желательно получить непосредственное управление от света большими токами и где инерционные свойства не играют большой роли, могут быть использованы так называемые фотореле. Прибор представляет собой в принципе комбинацию фотоэлемента с усилительной лампой. Многие исследователи пытались построить такой прибор, конструктивно оформленный в виде особой электронной лампы, заключающей в себе управляющий фотослой. Однако эти приборы не получили широкого распространения ввиду трудности их изготовления с однородными и наперед заданными параметрами. Поэтому, если не требуется особая компактность, предпочитают специальные схемы из фотоэлементов и усилительных ламп, дающих большие усиления и большие токи с минимальным количеством элементов схемы.

В настоящее время механическое телевидение развивается лишь в сторону улучшения конструктивного выполнения, главным образом, оптической части телевизионного устройства, пользуясь, по существу, обычными фотоэлементами для обращений колебаний интенсивности света в электрические импульсы. Так как возможности улучшения качества передаваемого изображения ограничены количеством используемого света, то, конечно, для современного механического телевидения применяются фотоэлементы с большой отдачей и безинерционные до очень высоких частот (порядка 10^6 Hz). Наряду с механическим телевидением за последнее время сильно развилось так называемое катодное телевидение, использующее фотоэлектрический эффект на новых принципах. Два направления в катодном телевидении определяются работами Зворыкина [1] и Франсворта [2]. В обоих случаях телевизионные устройства представляют собой особые приборы без участия каких-либо механических частей. Обе эти системы конкурируют между собой, далеко превосходя удобством эксплоатации и чувствительностью обычные механические устройства.

Еще одно, совсем недавно появившееся и оказавшееся весьма плодотворным, применение фотоэффекта заключается в использовании вторичной электронной эмиссии с фотоактивных поверхностей. Вторичная эмиссия позволяет получить большое и безинерционное усиление фототоков. Поэтому его можно применять как „усиление без искажений“ в катодном телевидении, что открывает перед последним еще бо́льшие перспективы.

I. Фотоэлементы

Вырывание электронов квантами света происходит, лишь начиная с определенной длины волны, лежащей для большинства металлов в далекой ультрафиолетовой области. Эта длина волны, называемая „красной границей“ фотоэффекта, лишь для щелочных металлов лежит в видимой части спектра. Поэтому именно щелочные металлы Li, Na, K, Rb и Cs употребляются в качестве фотоэлектрических поверхностей в технических фотоэлементах. Щелочные металлы, вообще обладающие малой работой выхода электронов (

соответствует расположению красной границы в видимой части спектра), характеризуются, кроме того, наличием некоторого максимума фотоэмиссии на кривой спектрального распределения (рис. 1). Наличие этого „селективного" максимума приводит к общему увеличению интегральной фотоэмиссии в видимой области. Относя интегральную фотоэмиссию к единице падающей световой энергии, мы получим даже для этих металлов чрезвычайно малые величины, не превышающие долей микроампера на люмен*, что недостаточно для технического использования. Поэтому все усилия экспериментаторов были направлены к тому, чтобы увеличить общую чувствительность фотоэлектрических поверхностей. Оказалось, что такого рода повышение чувствительности получается при обработке поверхности щелочных металлов различными газами или парами некоторых веществ. При этом одновременно уменьшается работа выхода (красная граница смещается в сторону больших длин волн) и иногда появляется новый селективный максимум (также лежащий в более длинноволновой части спектра). Такая обработка резко повышает чувствительность фотоэлемента, доводя ее для некоторых поверхностей до 20—40 μA/Lm.

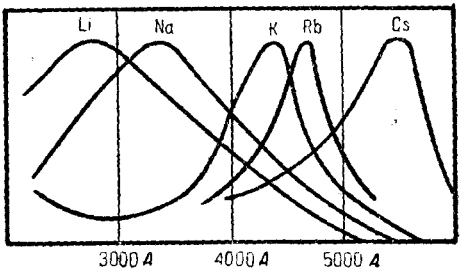

Рис. 1. Спектральные характеристики чистых щелочных металлов.

Наряду с увеличением фотоэлектронной эмиссии путем сенсибилизации поверхности применяется еще один способ ее увеличения, заключающийся в наполнении готового фотоэлемента инертным газом. При достаточной разности потенциалов между катодом и анодом фотоэлемента вырванные светом электроны, ускоряющиеся полем, ионизируют молекулы газа и увеличивают число заряженных частиц, идущих между электродами. В результате ток через фотоэлемент возрастает примерно в 10—12 раз.

Первыми техническими типами фотоэлементов были калиевые фотоэлементы, сенсибилизированные водородом. Изготовление их производится следующим образом. После обычной откачки и прогрева баллона на стенки наносится толстый слой калия, причем оставляется прозрачное окошко для прохождения света. В фотоэлемент впускается водород под давлением порядка десятых долей *мм* Hg, между катодом и анодом пропускается тлеющий разряд. При этом поверхность калия меняет окраску, что служит критерием количества поглощенного водорода. Вместе с тем происходит повышение чувствительности фотослоя, достигающей максимума при

* Люмен (Lm)—практическая единица светового потока. 1 международная свеча дает полный поток в 4 π люменов.

определенном количестве поглощенного водорода. Для увеличения чувствительности после обработки поверхности фотоэлемент обычно наполняется газом, на чем его изготовление и заканчивается. Такого рода сенсибилизация оказалось несовершенной, — со временем поглощенный водород может выделяться из поверхности, вследствие чего чувствительность фотоэлемента падает.

Интегральная чувствительность водородно-калиевых фотоэлементов не превышает нескольких микроампер на люмен (для вакуумных образцов); селективный максимум локализован в фиолетовой части спектра (4460 Å).

Следующим этапом развития были серно-калиевые фотоэлементы. В отличие от предыдущих слой калия наносится здесь на предварительно испаренную на стенки магниевую подкладку, служащую для лучшего контакта с вводом через стекло. Затем поверхность калия обрабатывается парами серы до получения некоторой оптимальной чувствительности. При массовом производстве здесь, так же как и в водородно-калиевых фотоэлементах, о степени готовности фотоэлементов судят по изменению окраски. Хорошо обработанная поверхность имеет золотисто-желтую окраску. Чувствительность также имеет порядок нескольких микроампер на люмен и после наполнения газом достигает в хороших образцах 30—40 микроампер.

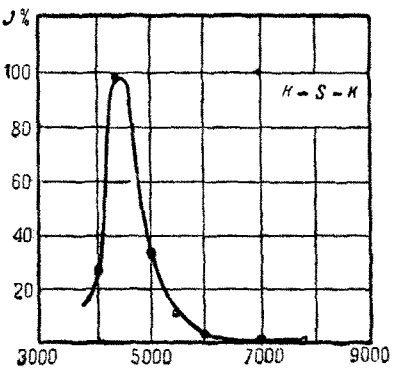

Рис. 2. Спектральная характеристика серно-калиевого фотоэлемента

Серно-калиевые фотоэлементы оказались более устойчивыми во времени и получили широкое распространение в технике. Селективный максимум для них лежит в пределах от 4300 до 4500 Å в зависимости от степени обработки поверхностей серой. Красная граница доходит до 7000 Å (рис. 2).

У нас в СССР распространены, главным образом, две конструкции фотоэлементов этого рода. Так как испарение магния на стенки баллона производится нагреванием кусочка магния в вольфрамовой спирали, то в одной конструкции анод делается в виде никелевого кольца, скрепляющего концы такой же спирали (рис. 3a и 3b). Кроме указанных типов, для специальных целей (например бильд-телеграф) изготовляются фотоэлементы особых конструкций, в принципе имеющие те же свойства и приспособленные лишь для наиболее удобного и полного использования света в данной оптической системе.

Как мы видим, чувствительность калиевых фотоэлементов при обоих способах обработки все же не слишком велика. Развитие телевидения предъявило высокие требования к дальнейшему повы-

шению чувствительности фотоэлементов. Естественно было обратиться к следующим по периодической системе щелочным металлам, имеющим еще меньшую работу выхода по сравнению с калием. Лучшим в этом отношении из известных в настоящее время элементов является цезий, но чистый цезий имеет чувствительность меньшую, чем обработанный калий. Из ряда экспериментальных и теоретических работ [3,4] выяснилось, что наименьшей работой выхода и интенсивным селективным максимумом должны обладать сложные поверхности, состоящие из перемежающихся слоев веществ с малой и большой работой выхода. Непосредственная обработка поверхности цезия серой, водородом и различными другими веществами не дала, однако, желаемого резкого повышения чувствительности.

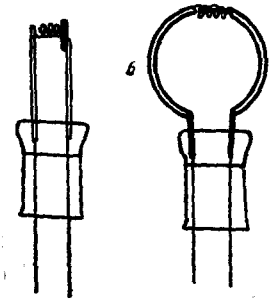

Рис. 3. Две конструкции анода фотоэлемента.

Работы Коллера [5] и Кэмпбелла [6] показали, что в этом случае необходимо итти по другому, более сложному пути. Техническое оформление цезиевые фотоэлементы получили в работах Зевига [7] и Прескотта и Келли [8]. Оказалось, что обработку катода, содержащего цезий, целесообразно вести не с поверхности толстого слоя металлического цезия, а, наоборот, следует цезий наносить из паров на предварительно подготовленную соответствующей обработкой металлическую подкладку.

В качестве подкладки в цезиевых фотоэлементах применяется серебро, либо нанесенное на стекло химическим путем или испарением, либо в виде серебряной пластины. Слой серебра окисляется разрядом в кислороде при давлении около 1 *мм* Hg на глубину около 100 атомных слоев. Глубина окисленного слоя может быть определена как прямым измерением количества поглощенного кислорода, так и по параллельно идущему изменению окраски поверхности серебра. Различные стадии окисления, на которых заканчивают процесс окисления, колеблются от синего до желто-зеленого оттенка. После эвакуирования кислорода металлический цезий, получаемый восстановлением из соли, оседает на поверхность окисленного серебра, отчасти вступая с ним в реакцию и давая окись цезия. В таком виде фотоэлемент еще не обладает нужной чувствительностью. Дальнейшее активирование поверхности осуществляется прогреванием фотоэлемента в печи при температуре около 200° С при непрерывной откачке. В течение этого процесса фотоэмиссия постепенно возрастает, достигая значительной величины. Хорошие экземпляры изготовленных фотоэлементов имеют от 20 до 40 μA/Lm. Наполнение газом доводит интегральную чувствительность до 300 μA/Lm.

Спектральная характеристика цезиевых фотоэлементов резко отличается от характеристики калиевых фотоэлементов. На рис. 4 можно видеть два характерных максимума: один, лежащий в фиолетовой части спектра, другой — в близкой инфракрасной части.

Красная граница достигает 12 000 Å. Данные, приводимые различными авторами, и в этом случае несколько разнятся между собой, особенно в отношении красной границы.

Как мы уже упоминали, цезиевые фотоэлементы могут быть двух типов: первый тип, изготовленный путем предварительного нанесения серебра на стекло, имеет такую же конструкцию, как и описанный выше калиевый (сферический баллон и различного вида анод), второй же тип оформляется в виде полуцилиндрической серебряной пластинки (катод), перед которой расположен никелевый анод в виде палочки или решетки (рис. 5). Вся конструкция заключена в цилиндрический баллон. Фотоэлементы подобной конструкции изготовляются в СССР, например ЦЛПС [9], а сферического типа с фотокатодами на серебряном слое, нанесенном на стекло, — ВЭИ.

Из спектральных характеристик различных фотокатодов следует, какими фотоэлементами желательно пользоваться, имея то или иное спектральное распределение применяемого в данном случае источника света. Цезиевые фотоэлементы в силу своей большой интегральной чувствительности удобны для всей области видимого спектра, а также для близкой инфракрасной части. Калиевые фотоэлементы удобны для сине-фиолетовой части спектра.

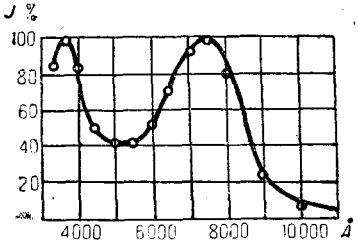

Рис. 4. Спектральная характеристика цезиевого фотоэлемента.

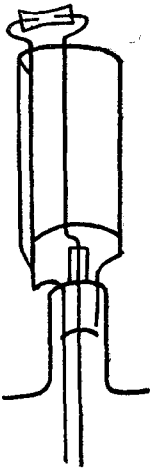
Рис. 5. Конструкция цезиевого фотоэлемента с пластинчатым катодом.

Для ультрафиолетовой части спектра можно пользоваться как рассмотренными типами фотоэлементов, так и фотоэлементами с катодами из чистых металлов, из которых наиболее удобен кадмий; конечно, баллоны таких фотоэлементов должны быть изготовлены из кварца (или иметь кварцевые окошки) или из специальных сортов стекла, прозрачных для такого рода лучей.

Как мы уже упоминали, для увеличения чувствительности вакуумных фотоэлементов их наполняют каким-либо инертным газом. Обычно для этой цели служат неон или аргон. Газы должны быть совершенно чистыми, свободными от примесей, могущих изменять свойства катода. Не говоря уже о кислороде или органических загрязнениях (пары замазки и т. п.), даже химически мало активный азот, адсорбируясь на поверхности катода, резко ухудшает его фотоэлектрические свойства. Особая чистота газа необходима для стабильности фотоэлемента во времени.

Типичные вольтамперные характеристики вакуумных фотоэлементов приведены на рис. 6. Различные вакуумные фотоэлементы

кроме величины тока насыщения, что зависит от чувствительности катода, отличаются еще анодным напряжением, при котором это насыщение наступает. Соответствующее анодное напряжение зависит, главным образом, от конструкции. Для сферических фотоэлементов с центральным анодом (самый распространенный тип

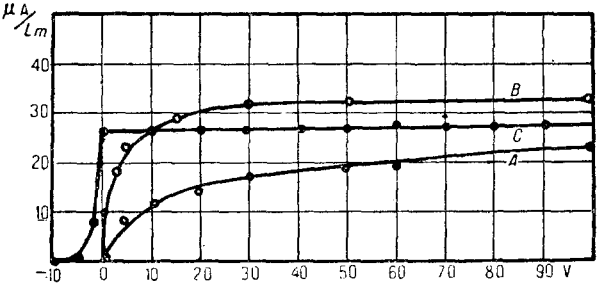

Рис. 6. Вольтамперные характеристики для вакуумных фотоэлементов. *A* — полуцилиндрический катод, анод-палочка, *B* — полуцилиндрический катод, анод-тетка, *C* — центральный катод.

фотоэлементов) насыщение наступает при довольно больших анодных напряжениях порядка 50—100 V. Это происходит потому, что электроны с поверхности катода вылетают по всевозможным направлениям, и часть их, не достигнув анода, попадает обратно на катод.

При обратном расположении, т. е. при центральном катоде и окружающем его сферическом аноде, все вылетевшие из центра сферы электроны неизбежно попадут на окружающую поверхность при самых малых анодных напряжениях. Технически такая конструкция невыгодна из-за малой поверхности катода, но при необходимости иметь насыщение при малом анодном напряжении можно выполнить это другим путем. Изготовляя катод в виде пластинки и располагая проволочную сетку, служащую анодом, на достаточно близком расстоянии от катода, мы получаем ток насыщения уже при 5—10 V.

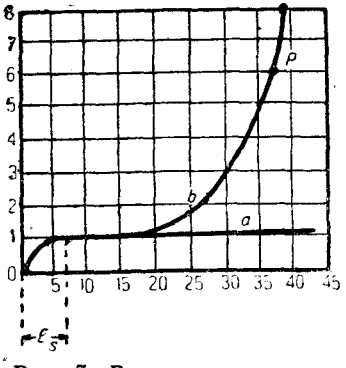

Рис. 7. Вольтамперная характеристика газонаполненного фотоэлемента. *P* — рабочая точка.

Совершенно другая картина наблюдается для газонаполненных фотоэлементов (рис. 7). При небольших анодных напряжениях, до наступления ионизации, они ведут себя подобно вакуумным. Затем ток начинает возрастать непропорционально приложенному напряжению. Далее идет некоторый, почти линейный, участок, который при дальнейшем увеличении напряжения переходит

в вертикальную прямую, соответствующую тлеющему разряду. Ток здесь ограничен лишь балластным сопротивлением в цепи фотоэлемента, и на этом участке уже никакой зависимости от освещенности не существует.

Потенциал зажигания самостоятельного разряда зависит от рода и давления наполняющего фотоэлемент газа, от конструкции и от количества начальных электронов. Поэтому потенциал зажигания в темноте вообще будет несколько выше, чем при освещении фотоэлемента. Даже при обычно употребляющихся весьма малых интенсивностях светового потока ($\sim$0,05 Lm) эта разница достигает 50 V. Кривая зависимости потенциала зажигания от освещенности, снятая для цезиевого фотоэлемента (конструкция, как на рис. 5), представлена на рис. 8.

Отсюда видно, какие напряжения следует подавать на фотоэлемент, чтобы использовать его наивыгоднейшим образом. В самом деле, из рис. 7 ясно, что рабочая точка для газонаполненного фотоэлемента должна быть выбрана на крутом участке характеристики, где усиление максимально. В действительности возможности в этом направлении ограничены близостью разряда. Поэтому трудно говорить о „чувствительности" газонаполненного фотоэлемента, — она будет зависеть от многих факторов, и это делает ее величиной, значительно менее определенной, чем для вакуумных фотоэлементов. Если для вакуумных фотоэлементов под чувствительностью подразумевают фототок, пересчитанный на единицу светового потока, определенного спектрального состава и измеряемый в области насыщения, то для газонаполненного фотоэлемента соответствующий фототок надлежит измерять в рабочей точке характеристики, положение которой определяется, как мы видели, более или менее произвольно. Стремление получить возможно более высокую чувствительность заставляет приближаться возможно ближе к потенциалу разряда, что особенно соблазнительно ввиду крутого роста чувствительности в интервалах напряжений, близких к разряду. Высокая чувствительность, достигающая при таких измерениях 500—600 μA/Lm, имеет, однако, весьма относительную ценность, так как работа в непосредственной близости с разрядом сопровождается возрастанием инерции, кроме того, появляются явления утомления. Вся работа фотоэлемента становится неустойчивой и характерной для переходного режима от несамостоятельного к самостоятельному разряду в газе. Ввиду

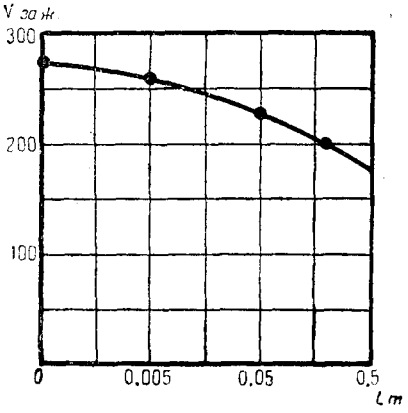

Рис. 8. Зависимость потенциала зажигания от освещенности.

этого не следует выбирать рабочую точку слишком близко к потенциалу зажигания разряда на свету; так, например, для фотоэлементов с потенциалом зажигания 250—300 V при обычно употребляющихся освещенностях (0,1—0,01 Lm) рабочая точка должна быть на 30—40 V ниже потенциала разряда.

Интегральная чувствительность фотоэлемента, таким образом, зависит от ряда факторов: его геометрии, давления и рода газа и, главным образом (для газонаполненных фотоэлементов), от приложенного напряжения. Но, кроме того, как мы уже указывали, говоря о спектральных характеристиках фотоэлементов, чувствительность в большой степени зависит еще от спектрального состава лучей, падающих на поверхность катода. Даже при освещении так называемым „белым светом" мы можем получить совершенно различные значения чувствительности в микроамперах на люмен (что является обычным техническим мерилом чувствительности) при небольших изменениях температуры накала источника света. Действительно, при повышении температуры максимум испускаемой источником света энергии перемещается в фиолетовую часть спектра согласно закону Вина. Поэтому физически правильно было бы измерять чувствительность фотоэлементов в кулонах на единицу (калорию или эрг) падающей монохроматической энергии. Так как это требует довольно сложных оптических устройств, то на практике все же пользуются в качестве единиц светового потока люменами, но с указанием абсолютной цветовой температуры источника, при которой измеряется чувствительность фотоэлемента. При техническом использовании фотоэлементов с разными катодами это обстоятельство играет важную роль.

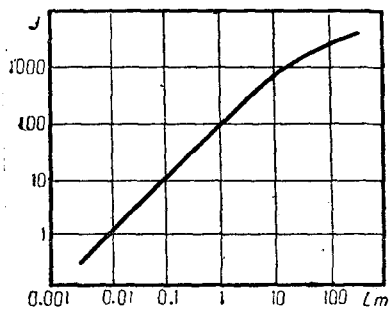

Рис. 9. Зависимость фототока от освещенности.

Все измерения чувствительности производятся, конечно, в предположении строгой пропорциональности между освещенностью катода и фототоком. В технических фотоэлементах этот простой закон фотоэлектричества перестает быть абсолютно строгим, и в области больших освещенностей отклонения от прямой пропорциональности становятся ощутимыми. Эти отклонения обусловлены рядом причин: появлением зарядов на стенках баллона фотоэлемента, изменением условий отражения света и изменением самой структуры катода. Из кривой рис. 9 впрочем видно, что во всем широком диапазоне освещенностей, употребляемых на практике (от 0,001 Lm до нескольких люменов), т. е. при изменении освещенности в 10 000 раз, пропорциональность обеих величин сохраняется полностью.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением свойств фотоэле-

мента только в статическом режиме. Между тем в большинстве технических применений фотоэлементы работают при высокой частоте импульсов света. В этих условиях у газонаполненных фотоэлементов проявляются некоторые новые свойства — так называемая инерция. Физическая природа явления состоит в том, что вырванные отдельным импульсом света электроны не сразу ионизируют газ, наполняющий фотоэлемент; образованные ионы также требуют известного времени для достижения соответствующих электродов, так как двигаются значительно медленнее электронов. Тогда при большой частоте импульсов света следующий импульс может наступить прежде, чем ионы, созданные предыдущим импульсом, дойдут до электродов. В результате и нарастание тока и его исчезновение будут происходить с запозданием относительно частоты импульсов света. Это явление иллюстрируется кривой рис. 10. Общее количество электричества в единицу времени, т. е. ток, проходящий через фотоэлемент, конечно, остается неизменным при любой частоте для данной интенсивности света. Однако амплитуда тока, проходящего через фотоэлемент (глубина модуляции), с повышением частоты световых импульсов уменьшается, а следовательно, уменьшается амплитуда напряжения на сопротивлении на входе усилителя. Практически это означает, что высокие частоты слегка срезаются, что вносит искажения в передачу. Из кривой рис. 11 видно, что инерция приобретает заметную величину, примерно начиная с 10 000 Hz. Таким образом для целей звукового кино газонаполненные фотоэлементы в достаточной степени пригодны, так как область звуковых частот, воспроизводящихся усилителями звуковых частот и репродукторами, обычно не превышает этой границы. Напротив, для целей телевидения, где область применяемых частот чрезвычайно широка и требует для удовлетворительного воспроизведения изображения частот свыше 500 000 Hz, газонаполненные фотоэлементы явно непригодны. Действительно, в телевидении пользуются исключительно вакуумными фотоэлементами.

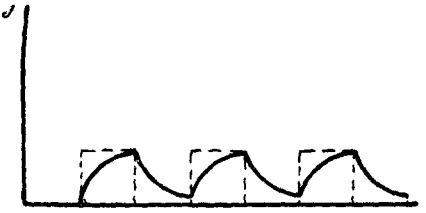

Рис. 10. Кривая фототока для газонаполненного фотоэлемента при большой частоте импульсов света.

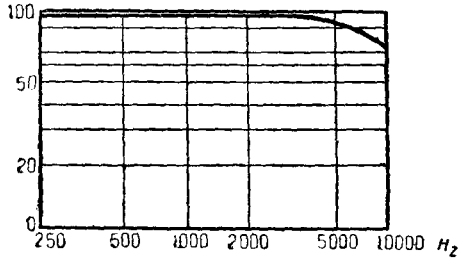

Рис. 11. Частотная характеристика газонаполненного фотоэлемента.

Резюмируя все вышеизложенное, можно сказать, что газонапол-

ненные фотоэлементы, имеющие большую отдачу, ограничены в своих применениях. Поэтому желательно дальнейшее усовершенствование вакуумных фотоэлементов, свободных от указанных недостатков газонаполненных фотоэлементов, в смысле повышения их чувствительности. Наиболее совершенными из разработанных до настоящего времени фотоэлементов являются цезиевые фотоэлементы. Не углубляясь в теоретические подробности, можно сказать лишь, что дальнейший технический прогресс в области изготовления фотоэлементов может осуществляться в двух направлениях:

1. Обработкой катода фотоэлемента, направленной в сторону лучшего использования падающего на фотоэлемент света (повышение шероховатости поверхности [11], сложные слои [12]).

2. Использованием некоторых явлений, непосредственно не связанных с фотоэффектом (отражение электронов, — динатронный эффект). Эти вопросы будут рассмотрены в дальнейшем (§ 4).

II. Фотореле

Как мы уже указывали, были попытки осуществить прибор, который давал бы в зависимости от света без сложной усилительной схемы большие токи, способные управлять электромагнитными реле. Одним из решений этого вопроса является конструкция [13], изображенная на рис. 12. Принцип прибора заключается в использовании „свободной сетки". В центре прибора находится нить накала, обладающая большой электронной эмиссией. По обеим сторонам ее находятся два электрода, из которых один служит анодом, а другой изолирован от остальных частей прибора. На стенке баллона нанесен фоточувствительный слой, на который по отношению к нити накала подается большой отрицательный потенциал. Под действием света фотокатод испускает электроны, которые ускоряются по направлению к аноду. Часть из них может попасть на свободный электрод G и зарядить его до некоторого отрицательного потенциала. При этом электрод G будет играть роль отрицательно заряженной сетки, что заставляет уменьшаться анодный ток с нити накала, и в некоторых пределах анодный ток будет зависеть от освещенности фотослоя.

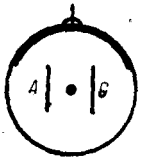

Рис. 12. Схема устройства фотореле с горячим катодом.

После прекращения действия света потенциал электрода G снова доходит до потенциала, близкого к нулю (считая за нуль потенциал нити накала), вследствие чего анодный ток опять возрастает до своего прежнего значения в темноте. Это происходит за счет разряжения электрода G положительными ионами газа, имеющегося в приборе (под очень малым давлением), при его затемнении.

Количественная теория явления, а также опытная проверка показывают, что зарядка и разрядка управляющего электрода тре-

буют заметного времени (инерция); это время зависит от освещенности, геометрии прибора и давления наполняющего фотореле газа. Для описанного прибора инерция при обычно употребляющихся освещенностях достигает сотых долей секунды. Зато получаемые токи составляют десятки миллиампер на люмен. Применение таких приборов, конечно, невозможно для звуковых частот, но они весьма удобны для всякого рода контрольных и регулирующих устройств. Целый ряд всякого рода фотореле кратко описан в книге Симона и Зурмана[14].

Фотореле все же не получили широкого распространения вследствие трудности изготовления. Для тех же целей применяют специальные схемы, некоторые из которых мы здесь приведем.

Наиболее простой из них является схема Розенберга[15] (рис. 13), в сущности действующая по тому же принципу, что и описанное выше фотореле с горячим катодом. Здесь применяется комбинация из фотоэлемента и усилительной лампы. Анод фотоэлемента подан непосредственно на сетку лампы и играет роль изолированного электрода фотореле. При освещении фотоэлемента он становится проводником и подает отрицательное смещение от вспомогательной батареи на сетку лампы. В результате лампа „запирается", т. е. анодный ток падает. При затемнении фотоэлемента сетка лампы оказывается изолированной и разряжается положительным сеточным током. Таким образом необходимым условием работы схемы является наличие в лампе положительного (ионного) сеточного тока. Несмотря на свою простоту, схема эта чрезвычайно чувствительна и обладает громадным коэфициентом усиления. В книге Гефкена[15] приведено множество других, более сложных схем, на подробном разборе которых мы здесь не можем останавливаться.

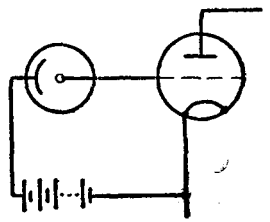

Рис. 13. Схема Розенберга.

В задачу настоящей статьи не входит исчерпывающий обзор всевозможных применений усилительных схем с фотоэлементами; в настоящее время такая „фототелемеханика" получила огромное распространение, в особенности в США. На недавно состоявшейся выставке „Век прогресса" в Чикаго (в конце 1934 г.) было продемонстрировано большое количество таких устройств. Фотоэлементы открывали двери при приближении людей; освещали темные до того времени витрины для проходящих мимо зрителей; были надежными хранителями выставленных ценностей и т. п. Больше того, сигнал об открытии выставки и внезапное ее освещение были включены от света звезды, проходившей в определенный час через меридиан Чикаго.

Надо сказать, что все эти замечательные применения фотоэлементов являются не только демонстрацией и рекламой технических достижений, но быстро проникают во все области промышленности.

III. Телевизионные приборы

Первым этапом в развитии телевидения была так называемая бильдтелеграфия, т. е. сравнительно медленная передача неподвижных изображений, главным образом печатного или рукописного текста. Принцип устройства передающей и приемной системы бильдаппарата ясен из рис. 14. Пучок, сфокусированный в точку, попадает на движущийся по винтовой нарезке цилиндр. Цилиндр обернут бумажным листом с передаваемым изображением (текстом). Диффузно отраженный свет попадает на фотоэлемент. Фототок определяется коэфициентом отражения света от различных точек изображения. Мы получаем, таким образом, переменные импульсы тока в зависимости от темных и светлых мест изображения, которые усиливаются и поступают в линию передачи.

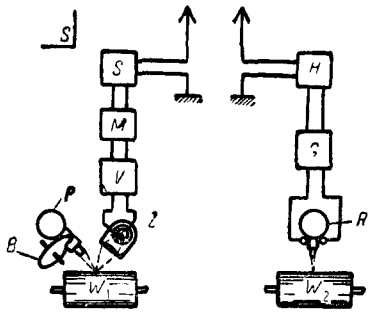

Рис. 14. Система бильдтелеграфии, S — отправительное, E — приемное устройство.

Приемное устройство изображено на правой стороне рис. 14. Приходящие импульсы тока усиливаются и поступают на световой модулятор, обычно представляющий собой конденсатор Керра или точечную газовую лампу. Свет от модулируемого источника попадает на фоточувствительную бумагу, зачерняя ее в полном соответствии с передаваемым изображением. Во избежание искажений приемный цилиндр должен двигаться вполне синхронно с передающим, что осуществляется специальным синхронизирующим устройством. Модулируемый источник света должен, конечно, обладать достаточной фотохимической активностью.

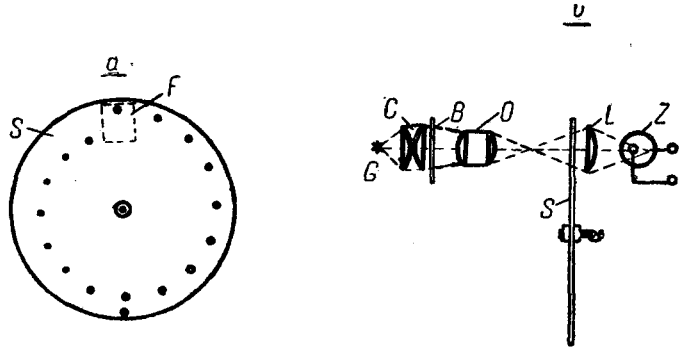

Рис. 15. Система телевидения с диском Нипкова. S — диск Нипкова, F — изображение „картинки" на диске, G — источник света, C и O — оптическая система, B — передаваемая „картинка", L — фокусирующая линза, Z — фотоэлемент.

Собственно телевидение или передача движущихся изображений

осуществляется в настоящее время несколькими различными способами. Старейшим из них является „механическое“ телевидение, не утратившее еще и сейчас своего технического значения, в особенности в связи с некоторыми новейшими усовершенствованиями. Опишем вкратце самую распространенную систему механического телевидения с диском Нипкова.. Свет, проходящий через изображение, развертывается диском Нипкова и фокусируется на фотоэлемент (рис. 15). За каждый оборот диска Нипкова каждое отверстие последовательно пробегает по соответствующей „строке“ изображения. Число отверстий определяет число строк в передаваемом изображении. Колебания света и тени в изображении превращаются в фотоэлементе в электрические импульсы. Чем детальнее мы хотим передать изображение, тем больше отверстий должно быть на диске Нипкова и тем меньше должна быть площадь каждого отверстия. Более детальная развертка связана с уменьшением интенсивности света, попадающего на фотоэлемент. Это не представляет особых затруднений для неподвижных изображений, так как можно применить более сильный источник света. Но уже в случае передачи кинофильма, а тем более при передаче естественно освещенных предметов или пейзажей мы сталкиваемся с все бо̀льшими трудностями из-за ограниченной чувствительности фотоэлемента при столь малых интенсивностях света, так как усиление очень малых фототоков представляет большие, а иногда даже непреодолимые затруднения. Несколько лучшее использование света дает применение так называемого зеркального винта, который по существу дает такую же развертку, как диск Нипкова, но даже и при этом света от естественно освещенных объектов недостаточно для детальной развертки, т. е. для хорошего качества изображения. Таким образом механическое телевидение зашло в тупик, выход из которого наметился лишь в самое последнее время в нескольких различных направлениях.

Одна из идей оставляет самый принцип механического телевидения без изменения и пошла по пути усовершенствования фотографической части аппаратуры. Вместо того чтобы непосредственно передавать слабоосвещенную натуру, в методе „промежуточной пленки“ (Zwischenfilm) объект предварительно снимают на кинопленку, которую успевают проявить в специальном аппарате и пропустить затем через телевизионный отправительный аппарат. Обе части аппарата (фотографическая и телевизионная) смонтированы вместе; время между фотографированием и отправлением в силу значительного усовершенствования фотохимических процессов настолько незначительно (меньше минуты), что этот метод позволяет почти немедленно передавать изображение любого объекта, освещенного достаточно для съемки обычным киноаппаратом. Затруднения со светом оказываются здесь, таким образом, преодоленными, но громоздкость аппаратуры механического телевизионного передатчика еще усугубляется введением достаточно сложных фотохимических приспособлений.

Принципиально совершенно другой подход к проблеме передачи

изображений мы находим в так называемом „катодном телевидении". Получили распространение две системы катодного телевидения — Зворыкина[21] и Фарнсворта[20]. Система Зворыкина была уже описана в этом журнале. Отметим, что превращение невидимого изображения в видимое, характерное как один из видов использования системы Зворыкина, описано также другим автором[16]; соответствующий прибор был назван конвертором света.

Перейдем теперь к описанию системы телевидения по способу Фарнсворта. Прибор Фарнсворта в его первоначальном виде не имеет преимущества перед механическим телевидением в отношении чувствительности. Этот прибор, названный им „диссектором" (буквально „рассекатель"), изображен на рис. 16. Фоточувствительный катод нанесен на стекло полупрозрачным слоем, так что изображение можно проектировать на фотокатод с внешней стороны. При этом на катоде получается электронное изображение, т. е. с разно освещенных участков катодов идет фототок различной интенсивности. Если на пути вырванных электронов поместить плоский анод, то мы получим какой-то средний ток, не зависящий от распределения освещенности на поверхности фотокатода.

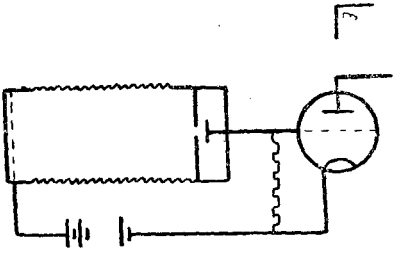

Рис. 16. Диссектор Фарнсворта.

Однако на каждую точку анода попадает электронный ток такой же интенсивности, как он получается в соответствующей точке электронного изображения на фотокатоде. Электронное изображение будет при этом перенесено на анод без искажения лишь в случае однородного электростатического поля между электродами, что достигается нанесением металлического слоя с большим сопротивлением на боковые стенки прибора (кроме того, применяется магнитная фокусировка). В центре анода имеется небольшое отверстие (диаметр около 0,4 *мм*), через которое ускоренные довольно большим полем электроны (между катодом и анодом приложено 600 V) попадают на второй анод, поставленный за отверстием. В отличие от иконоскопа Зворыкина, где электронное изображение было неподвижно и его развертка производилась бегающим по нему узким электронным пучком, здесь движется само электронное изображение, причем через отверстие поочередно проходят и попадают на второй анод отдельные участки электронного изображения.

Развертка производится двумя взаимно перпендикулярными магнитными полями.

Несмотря на принятые для улучшения однородности поля меры, в диссекторе Фарнсворта получаются искажения на краях изображения.

Итак, в настоящее время существуют следующие системы телевидения: механическое телевидение, получившее большое распро-

странение в Германии особенно благодаря его усовершенствованию методом промежуточной пленки, и катодное телевидение, успешно развивающееся в Америке в обоих указанных направлениях. Трудно отдать предпочтение какому-либо из этих методов, так как колоссальное повышение чувствительности в методе Фарнсворта, достигнутое применением электронного умножителя (о котором подробнее мы скажем далее), может быть использовано и в механическом телевидении.

Приемное устройство для телевидения, конечно, не зависит от применяющейся системы передатчика. Прежде в качестве телевизора применялся тот же диск Нипкова с неоновой лампой или керр-элементом. Это устройство обладает рядом недостатков; главным из них, конечно, является малая интенсивность света в получаемом изображении, малые размеры самого изображения, а также искажения, свойственные самой неоновой лампе. Теперь почти совершенно отказались от телевизора такого типа и перешли на катодный телевизор, который представляет собой в принципе катодный осциллограф, усовершенствованный для телевизионных целей. В СССР на заводе Светлана (Ленинград) разработаны такие катодные приемные трубки („кинескоп").

IV. Электронный умножитель

Уже довольно давно известно[17], что электроны, попадающие на поверхность металла с некоторой скоростью, диффузно отражаются

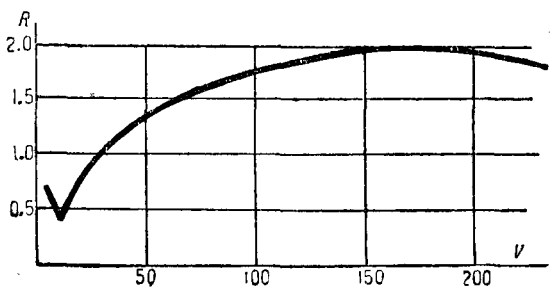

Рис. 17. Зависимость коэфициента отражения от скорости падающих электронов для чистого металла.

от этой поверхности. Коэфициент отражения, т. е. отношение числа рассеянных электронов к числу падающих, в сильной мере зависит от скорости падающих электронов. При некоторых значениях скорости (т. е. некоторых значениях приложенной разности потенциалов), характерных для данной поверхности, коэфициент отражения становится больше единицы. Для большинства чистых металлов коэфициент отражения становится больше единицы при достижении электронами скоростей, соответствующих 30—40 V. На рис. 17 показан общий характер хода коэфициента отражения $R = \frac{I}{I_0}$

в зависимости от скорости падающих электронов[18]. При малых скоростях вначале R быстро падает, доходя до минимального значения, после чего начинает возрастать более плавно, становится больше единицы и переходит через размытый максимум.

Начальное падение коэфициента отражения можно объяснить тем, что при малых скоростях большая часть электронов отражается; по мере повышения скоростей электроны проникают глубже в толщу металла, и отражение падает. Но параллельно с этим из глубины металла начинают вырываться новые электроны. Их количество должно возрастать с увеличением энергии падающих электронов, что объясняет новый подъем кривой. Скорость вырванных электронов (а следовательно, и их энергия), как показало детальное исследование, много меньше, чем скорость падающих; поэтому их число может превышать число падающих электронов, т. е. коэфициент отражения становится больше единицы. Наконец, при очень больших скоростях падающих электронов они могут проникать в металл настолько глубоко, что выход наружу для вырванных электронов становится затрудненным, и мы наблюдаем постепенный спад кривой отражения.

Описанная в общих чертах картина* относится к любым поверхностям; однако величина и положение максимума на кривой в высокой степени зависят от свойств поверхности. Экспериментальные данные показывают, что максимум R возрастает с уменьшением работы выхода поверхности. Действительно, поверхность обычных цезиевых катодов, обладающая минимальной, из известных, работой выхода, дает большой коэфициент, доходящий до $R = 8—10$.

В технике столкнулись с большим коэфициентом отражения $R > 1$ при работе с катодными лампами; это явление, названное „динатронным эффектом", нарушало нормальный режим работы лампы, а потому с ним всячески боролись. Немногие попытки его использовать оказались не слишком удачными.

В настоящее время к этому явлению подошли с совершенно другой стороны, и новые идеи использования эффекта оказались чрезвычайно плодотворными и многообещающими.

Пусть на сильно отражающую поверхность падает пучок электронов. Если отражающая поверхность обладает коэфициентом отражения R и сила тока в первичном пучке будет I_0, то на собирающий электрод (коллектор), имеющий положительный потенциал по отношению к отражающей пластине, пойдет ток RI_0. Следовательно, при $R > 1$ мы получим своеобразное усиление первичного тока. Описанный здесь в принципе прибор носит название „электронного умножителя". Такого рода усиление коренным образом отличается от обычной ламповой усилительной схемы, где каждый каскад содержит комбинацию емкостей и сопротивлений. Вместо усиления напряжений на каждом каскаде в электронном умножи-

---

* Как здесь, так и в дальнейшем мы пользуемся термином „отражение" для любых значений R, меньших или больших единицы, хотя физически $R > 1$ означает вырывание электронов.

теле мы получаем непосредственное увеличение количества электричества, проходящего в цепи коллектора. Для еще бо́льшего увеличения тока в электронном умножителе можно заставить электронный пучок отражаться несколько раз, что будет соответствовать многокаскадному ламповому усилителю.

Простой прибор, основанный на усилении фототока при однократном отражении, построили Ямс и Зальцберг[19]. Так как их целью было построить фотоэлемент с большой отдачей, то конструктивное оформление должно было удовлетворять определенным техническим требованиям. Антикатод (катод вторичной эмиссии) и коллектор должны по возможности меньше заслонять фотокатод от падающего света, коллектор должен обладать большой проницаемостью для фотоэлектронов, но вместе с тем при неслишком больших потенциалах хорошо собирать отраженные от антикатода электроны. Кроме того, междуэлектронные емкости должны быть достаточно малы (общее требование для приборов, работающих на высоких частотах). В „фотодинатроне" Ямса и Зальцберга цезиевый фотокатод имеет форму полуцилиндрической пластинки, ребром к которой расположен плоский антикатод (тоже с цезированной поверхностью), окруженный коллектором в виде плоской редкой сетки (рис. 18). При исходной чувствительности фотокатода в 27 μA/Lm этот фотодинатрон дает около 150 μA/Lm, что соответствует примерно шестикратному усилению. К антикатоду приложен положительный потенциал в 200 V, а к коллектору в 250 V относительно катода. Коэфициент отражения, а следовательно, и усиление, можно повысить, давая большие ускоряющие вольты на антикатод и коллектор, но повышение это незначительно.

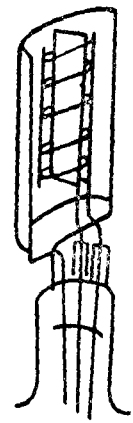

Рис. 18. Фотодинатрон конструкции Ямса и Зальцберга.

Сходный прибор был разработан в ВЭИ с несколько видоизмененной конструкцией. Цезиевые катод и антикатод нанесены друг против друга на стенки сферической колбы. Коллектор (редкая сетка) расположен у самого антикатода. Свет попадает на катод через прозрачную боковую поверхность колбы (рис. 19). Коэфициент отражения здесь равен примерно 6, выход близок к 160 μA/Lm.

Как мы уже говорили, выгоднее использовать многократное отражение. Пусть n_0 — начальное число электронов, испускаемое катодом, и R — коэфициент отражения поверхности антикатода. Тогда после первого отражения число электронов будет n_0R, после второго n_0R^2 и т. п. После k отражений число электронов возрастет до

$$n = n_0R^k,$$

что уже при небольшом k дает колоссальное усиление. В институте телемеханики (Ленинград) разработан ряд приборов разной конструкции, основанных на этом принципе. Опишем один из таких

приборов (рис. 20). В цилиндрическую трубку впаяно несколько электродов (до 10), каждый из которых представляет собой фотокатод.

Первый из них при освещении испускает фотоэлектроны, которые „заворачиваются" перпендикулярным магнитным полем по направлению к соседнему электроду. Каждый электрод имеет положительный потенциал по отношению к предыдущему; магнитное и электрическое поле подобраны так, чтобы электроны, вылетевшие из одного электрода, ударялись о следующий с достаточной для вырывания вторичных электронов скоростью. Последний электрод имеет наибольший положительный потенциал и служит коллектором. Полученные токи составляют несколько миллиампер при освещенностях порядка нескольких сотых люмена. Усиление, даваемое прибором, составляет примерно 10^5. Совершенствуя отражающие поверхности, можно получить еще бо́льшие усиления.

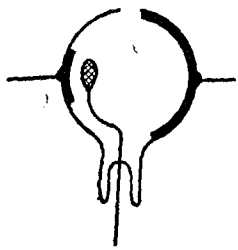

Рис. 19. Фотодинатрон конструкции ВЭИ.

Фарнсворт, давно уже занимающийся отражением электронов, в конце прошлого года опубликовал полученные результаты и их применения к телевидению. Им были разработаны многократные электронные умножители двух типов — статического и динамического. Статический прибор сходен по своему принципу с описанным выше прибором Института телемеханики. Статический умножитель Фарнсворта изображен на рис. 21. На стенки трубки нанесена испарением или распылением тонкая полупрозрачная пленка платины или никеля. Сопротивление между двумя концами этого слоя колеблется в пределах от 0,5 до 2 MΩ. Поверх никелевой пленки нанесен слой серебра, из которого соответствующей обработкой получается цезиевый фотокатод. Вдоль оси трубки натянута тонкая проволока, служащая анодом. К одному концу ее прикреплен металлический коллектор в виде воронки. К обоим концам полупроводящего фоточувствительного слоя приложена значительная разность потенциалов (свыше 500 V), так что вдоль трубки создается градиент потенциала. Анод (коллектор) имеет наибольший положительный потенциал. Фотоэлектроны, испущенные из верхнего конца трубки, ускоряются к аноду, одновременно двигаясь вдоль не вследствие градиента потенциала. Они попадают на противоположную стенку с некоторой скоростью порядка 100 V или более, в зависимости от места попадания. При этих скоростях они вырывают вторичные электроны, которые в свою очередь ускоряются таким же образом; достигая противоположной стенки, они

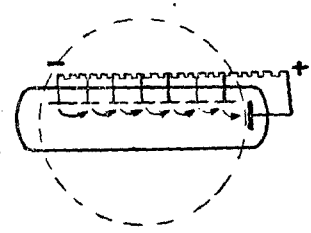

Рис. 20. Электронный умножитель Института телемеханики. Пунктиром обозначено магнитное поле, перпендикулярное к плоскости рисунка.

вновь вырывают увеличенное число электронов. Таким образом каждое поперечное прохождение дает увеличение числа электронов. Усиление, получаемое этим способом, зависит от средней пройденной разности потенциалов перед каждым ударом (коэфициент отражения зависит от скорости электронов) и от количества ударов согласно вышеприведенной формуле. Вплоть до появления пространственного заряда конечный электронный ток прямо пропорционален числу начальных электронов. В этом приборе усиление получалось в 10^4 раз и даже более в зависимости от качества трубки и приложенных потенциалов. Достоинством статического прибора Фарнсворта является возможность управления без магнитного поля.

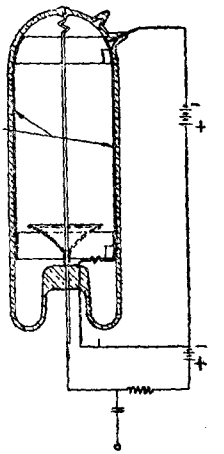

Рис. 21. Статический умножитель Фарнсворта.

В описанных типах электронных умножителей усиление достигалось многократным отражением от ряда поверхностей; можно ограничиться только двумя поверхностями, но заставить электронный пучок много раз отражаться от каждой из них. Этот принцип использован в динамическом (радиочастотном) умножителе Фарнсворта. На рис. 22 в основных чертах показана конструкция этого прибора. Он представляет собой цилиндрическую трубку, с обеих сторон которой имеются плоские цезиевые фотокатоды. Между этими фоточувствительными пластинками расположен цилиндрический анод (коллектор). Коллектор может занимать все пространство между пластинами или быть только центральным кольцом. На трубку надет соленоид, питаемый постоянным током, для создания про-

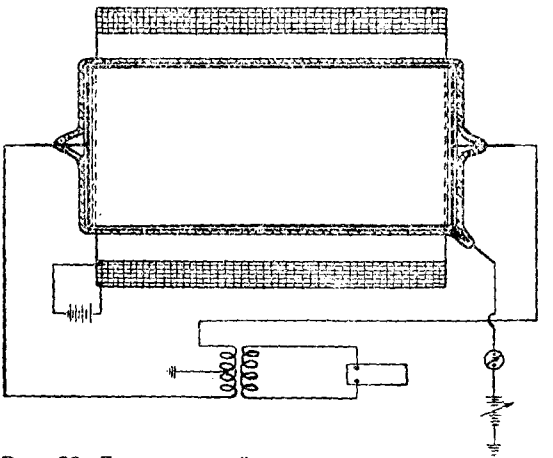

Рис. 22. Динамический умножитель Фарнсворта.

дольного фокусирующего магнитного поля между катодами. На катоды подается напряжение высокой частоты порядка $5 \cdot 10^7$ Hz или выше. На анод подан положительный потенциал от добавочной батареи; отрицательный полюс (средняя точка генератора высокой частоты) заземлен. Электрон (например фотоэлектрон), испущенный одним из катодов, ускоряется к противоположному под действием анодного напряжения. Он не попадает на анод вследствие фокусирующего действия магнитного поля и достигает противоположного электрода, если размеры трубки, напряжение и период поля высокой частоты таковы, что электрон успевает пролететь расстояние между пластинами за время, равное полупериоду приложенной высокой частоты. За это время поле высокой частоты не изменяет своего направления и непрерывно ускоряет электрон. Время полета определяется расстоянием между пластинами и скоростью, полученной от анодного напряжения, плюс интегральный эффект от потенциала между катодами за время полета. Если напряжение высокой частоты достаточно велико, то происходит вырывание вторичных электронов, которые затем под действием поля, изменившего знак, ускоряются в обратном направлении, чтобы в свою очередь вырвать электроны из первой пластины. В дальнейшем процесс повторяется. Таким образом с каждым ударом происходит умножение числа электронов в соответствии с формулой (1):

$$n = n_0 R^k,$$

где k попрежнему означает число отражений. Нужно заметить, что без напряжения высокой частоты на катодах анодный потенциал задает лишь среднюю скорость электронов, идущих через трубку, но не влияет на скорость удара, так как ускорение, которое получает электрон, оставляющий один из катодов, по мере приближения к аноду полностью нейтрализуется замедлением при приближении к другому катоду. Для того чтобы получить коэфициент отражения больше единицы, необходимо на катоды подавать напряжение высокой частоты — не меньше 50 V. Так как время пролета при частоте в $5 \cdot 10^7$ должно быть порядка 10^{-8} сек., то расстояние между катодами, как показывают приближенные вычисления, должно быть порядка нескольких сантиметров. По данным Фарнсворта это расстояние равнялось 6 *см*; подбирая анодное напряжение, можно было добиться точного совпадения времени пролета электронов с полупериодом поля высокой частоты. Это значение напряжения определялось по резкому возрастанию тока на коллектор.

В самом деле, хотя попадание одиночного электрона на коллектор почти невозможно вследствие наличия фокусирующего магнитного поля, но при данной форме и расположении последнего некоторая часть всех электронов все же будет на нем собираться. Эта часть будет зависеть от мест катодов, испускающих вторичные электроны (т. е. от того, будут ли электроны ударяться ближе к центру или к периферии пластин), и от поперечной составляющей электрического поля в трубке, которая будет обусловлена

влиянием пространственного заряда. Чем больше фокусирующее поле, тем больших значений может достигать колебательный ток между пластинами. Возрастанию тока между пластинами, однако, ставится предел возрастанием плотности пространственного заряда. Действительно, в конце концов будет достигаться такое состояние, при котором число новых испускаемых вторичных электронов сделается равным числу собираемых на коллекторе, — ток „отсоса" (ток на коллектор) станет постоянным (насыщение). В условиях равновесного режима, когда на коллектор в единицу времени поступает столько же электронов, сколько их образуется при отражении, по Фарнсворту можно получить ток до 0,5 А. Можно было бы думать, что для получения такого тока отсоса необходимо очень большое число отражений. Однако даже если предположить, что начальный ток ничтожно мал, составляя, например, 10^{-18} А, а коэфициент отражения $R = 6$, то, пользуясь уравнением (1), мы получим:

$$0{,}5 = 10^{-18}\, 6^k,$$

отсюда

$$k = \frac{17 \cdot \lg 5}{\lg 6} = 16.$$

Таким образом при этих условиях достаточно всего лишь 16 отражений. Легко видеть, что уже при 105 отражениях один единственный начальный электрон дает 10^{82} электронов, и всех электронов во всей вселенной (по Эйнштейну — Де-Ситтеру число их равно 10^{79}) хватило бы лишь на поддержание тока, в тысячу раз более слабого.

На самом деле, хотя в этом типе умножителя при малых начальных токах можно добиться огромных коэфициентов усиления, практически пока при употребляющихся освещенностях получено усилений лишь в несколько тысяч раз вследствие ограничивающего действия пространственного заряда. Это усиление не является, конечно, предельным и может быть увеличено соответствующим подбором электрических и магнитных полей или применением нескольких ступеней умножения.

Фарнсворт использовал динамический умножитель в своем телевизионном приборе. На рис. 23 изображен прибор, представляющий собой комбинацию телевизионной трубки с умножителем. На стекло трубки нанесен полупрозрачный цезиевый фотокатод *AB*. С внешней стороны на него фокусируется оптическое изображение. Против катода расположен вспомогательный анод с отверстием в центре. Анод и катод соединены полупроводящей пленкой металла, что создает равномерный градиент поля и удаляет заряды со стенок. После вспомогательного анода помещается динамический умножитель, причем в катоде умножителя, обращенном к вспомогательному аноду, также имеется отверстие. Расстояние между катодами около 6 *см*. Коллектор представляет собой кольцо, находящееся посередине между катодами. Вся усилительная трубка закрыта металлической оболочкой. Между катодом, на который па-

дает изображение, и вспомогательным анодом приложено высокое напряжение порядка 600 V.

Вспомогательный анод имеет небольшой положительный потенциал по отношению к первому катоду умножителя для избавления от вторичных электронов, получающихся около отверстия и могущих давать искажения. Между катодами, через переменный конденсатор, приложено напряжение высокой частоты, так что потенциал высокой частоты также можно менять. Коллектор имеет положительный потенциал порядка 90 V по отношению к катодам умножителя. Усиленные импульсы в электронном умножителе подаются на ламповый усилитель с сопротивления в цепи коллектора.

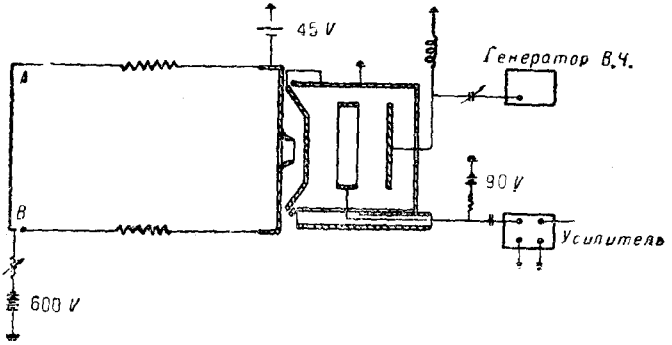

Рис. 23. Телевизионный прибор Фарнсворта с динамическим умножителем.

В приборе Фарнсворта осуществляются магнитная фокусировка и развертка. Чрезвычайно трудно совершенно устранить взаимное влияние магнитных полей фокусирующих и развертывающих катушек, поэтому изображения, передаваемые прибором Фарнсворта, имеют характерные искажения. Это не является, однако, принципиальным недостатком системы, и можно надеяться, что в дальнейшем эти технические недостатки будут сведены до минимума. Чувствительность системы Фарнсворта с электронным умножителем не уступает чувствительности иконоскопа Зворыкина и вполне пригодна для телевидения при естественном освещении.

Фарнсвортом было разработано также специальное приемное устройство, представляющее собой обычный телевизионный приемник с катодным осциллографом, но также с магнитной фокусировкой. Помимо телевидения, электронный умножитель может быть использован для многих других радиотехнических целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zworykin, J. I. E. E. **73**, 437, 1933.
2. Farnsworth, U. S. Patent N I, 773, 980.
3. Fowler, Proc. Roy. Soc. A **128**, 123, 1930
4. Olpin, Phys. Rev. **36**, 251, 1930.
5. Koller, Phys. Rev. **36**, 1699, 1930.

6. Campbell, Phil. Mag. **12**, 173, 1931.
7. Sewig, Z. Physik **76**, 91, 1932.
8. Preskott & Kelly, Bell. Syst. Techn. Journ. **11**, 334, 1932.
9. Киселев и Лукьянов, Журнал техн. физики IV, 1560, 1934.
10. Усиков, Бюлл. Ц. Л. П. С. **2**, 38, 1934.
11. Kluge, Phys. Z. **22**, 844, 1933.
12. Asao a. Susuki, Proc. Inst. of Radio Eng. **19**, 655, 1931.
13. Равдель, Журнал техн. физики **4**, 1174, 1934.
14. Simon u. Suhrmann, „Lichtelektrische Zellen und ihre Anwendung", Berlin, 1932.
15. Geffken, Richter, Winkelmann „Lichtelektrische Zelle als Technische Steuerorgan", 143.
16. Holst, de Boer, Teves a. Veenemans, Physica **4**, 297, 1934.
17. Bayer, Phys. Z. **10**, 168, 1909; Hull. Phys. Rev. **7**, 1, 1916.
18. Лукирский, „Известия Г. Ф. Т. И." **1**, 107, 1922.
19. Jams & Salzberg, Proc. Inst. of Radio Eng. **23**, 55, 1935.
20. Farnsworth, Journ. Frankl. Inst. **218**, 411, 1934.
21. Зворыкин, Успехи физ. наук **14**, 778, 1934.