

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ *

В. К. Зворыкин

I. ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Начало развития электронной оптики может быть отнесено непосредственно к моменту открытия самих электронов. Первым исследователям, работавшим в этой области, было известно, что тело, помещенное на пути катодного луча, отбрасывает на флуоресцирующий под действием этого катодного луча экран резкую тень, так что, по крайней мере, в этом отношении катодные лучи оказались сходными с лучами света. Спустя некоторое время после открытия электронов, такие исследователи как Буш, Девиссон и Кольбик, позднее — Кноль и Руска (Лаборатория высоких напряжений Т. Н., Берлин), затем Брюхе, Иогансен и Шерцер (Исследовательский институт AEG), а также Пихт (Берлин) и Глезер (Прага) занялись определением траекторий электронов, положив тем самым основание изучению электронной оптики. С тех пор эти вопросы подвергались все более и более детальному исследованию по мере того, как важность электронной оптики становилась все более и более очевидной.

Особый интерес представляет вычисление траекторий электронов в полях, обладающих аксиальной симметрией. Можно показать, что в этого вида электростатических или магнитных полях электронные лучи преломляются точно так же, как лучи света при прохождении через линзу. Эта возможность установить аналогию между электронно-оптической системой и системой оптических линз во многих случаях упрощает количественные и качественные исследования систем электронных линз.

Аналогия между электронными и световыми лучами видна, например, из поведения электронов, пролетающих через диафрагму с потенциалом V из точки, напряженность поля в которой равна E_1 , в точку с напряженностью поля E_2 . В этом случае диафрагма заставляет электроны сходиться точно так же, как заставила бы сферическая линза с фокусным расстоянием $f = \frac{4V}{E_2 - E_1}$. Подобно тому, как стеклянная линза дает изображение источника света, с помощью диафрагмы можно получить электронное изображение.

* Z. techn. Phys. № 6, стр. 169, 1936. Перевод Д. В. Зернова.

Далее оказалось, что каждое аксиально-симметричное электростатическое поле вызывает действие, аналогичное действию положительной или отрицательной линзы, если только путь электрона проходит не слишком далеко от оси симметрии.

В наши намерения не входит давать описание теоретических исследований в области электронной оптики, и мы займемся лишь рассмотрением известных практических деталей, касающихся получения электронных изображений. Далее мы ограничимся, главным образом, рассмотрением вопроса получения электронных изображений при помощи электростатических полей в ущерб системам, состоящим из магнитных или комбинированных магнитных и электростатических линз.

Если бы электронная оптика представляла лишь академический интерес, ей никогда бы не уделялось такого большого внимания,

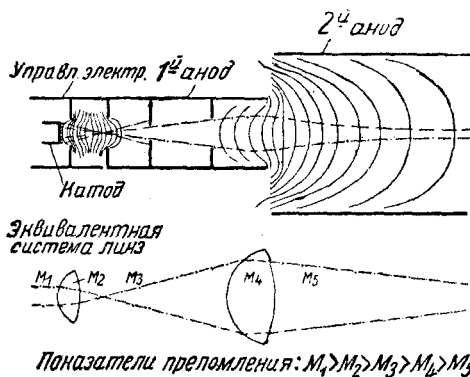


Рис. 1. Электронная оптика кинескопа и аналогичная ей система оптических линз



Рис. 2. Изображение, полученное с помощью кинескопа (343 строки)

как это имеет место в настоящее время. Двумя наиболее важными и наиболее изученными практическими применениями являются электронный прожектор и электронный микроскоп. Характерная особенность первого состоит в том, что в нем чрезвычайно малый источник электронов должен быть сфокусирован в чрезвычайно малое изображение или пятно. При этом как изображение, так и предмет лежат вблизи оси симметрии, и различные искажения изображения не играют большой роли. Типичный пример электронного прожектора представлен на рис. 1. Система состоит из двух линз (ср. эквивалентную систему линз под чертежом электронного прожектора), дающих не изображение самого катода, а отображающих на экран точку, расположенную перед катодом (точку пересечения электронных лучей). Этот вид электронной оптики играет большую роль в катодных осциллографах вообще и в технике катодного телевидения в особенности. Последнее применение было уже ранее описано¹.

Качество передачи изображения зависит в первую очередь от точности фокусировки электронного луча как в передающем, так и

в приемном устройстве. Достижения в этой области можно видеть из рис. 2, на котором дана фотография телеизображения кинофильма при разложении на 343 строки.

Во втором практическом применении — электронном микроскопе — электронная оптика используется для получения сильно увеличенного изображения малого предмета. На рис. 3 изображен электронный микроскоп. Рисунок заимствован из прекрасной книги Брюхе и Шерцера, посвященной электронной оптике. Существует большое количество типов этих микроскопов, использующих комбинированные электростатические и магнитные поля. Обсуждение этих предметов выходит, однако, за пределы настоящей статьи.

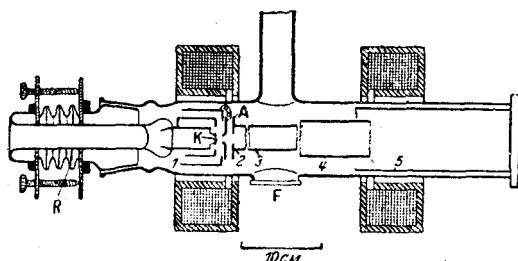


Рис. 3. Электронный микроскоп по Брюхе и Шерцеру

В процессе наших исследований электронной оптики перед нами встала задача получения изображения предмета относительно больших размеров. Далее оказалось необходимым воспользоваться для достижения этой цели исключительно электростатическими средствами². Оптической аналогией этой системы является система линз копировальной камеры. Удовлетворительное решение этой проблемы требует:

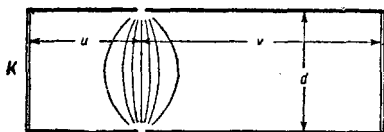


Рис. 4. Электроннооптическая система, состоящая из электронной линзы, образованной двумя коаксиальными цилиндрами

- 1) чтобы изображение было свободно от искажений,
- 2) чтобы область наилучшей резкости была возможно большей,
- 3) чтобы действующая апертура линзы была велика,
- 4) чтобы размеры предмета и изображения были велики.

Увеличение этой системы должно было быть примерно равным 1, т. е. оставаться в пределах от $1/2$ до 3.

В качестве принципиальной основы этой системы мы рассмотрим поле между двумя коаксиальными цилиндрами одинакового диаметра. Подобный прибор схематически изображен на рис. 4. Катод K представляет собой полупрозрачный фотоэлектрический слой, Флуоресцирующий экран L , подобно экрану в катодных осциллографах, наносится напылением тонкого слоя вольфрамата

кальция на дно трубки. Между обоими цилиндрами накладывается разность потенциалов. Катод и связанный с ним цилиндр заряжаются отрицательно, тогда как экрану и длинному цилиндру сообщается положительный потенциал. Если теперь спроектировать оптическое изображение на фотокатод, то из катода будут вылетать электроны в количестве, пропорциональном интенсивности света, падающего на данный участок поверхности. Эти электроны проектируются электростатической линзой (поле между двумя цилиндрами) на

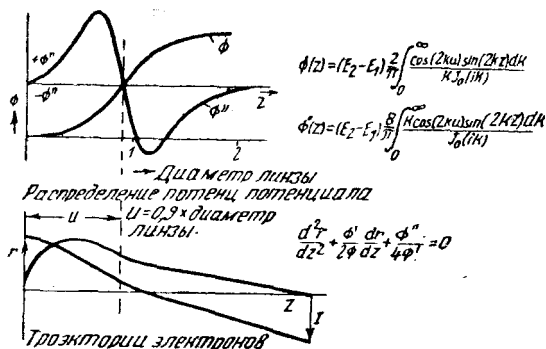


Рис. 5. Распределение потенциала и траектории электронов в электронном преобразователе изображений

экран в виде обратного изображения. Так как эта система представляет собой основу трубок, служащих для преобразования изображений, имеет смысл рассмотреть ее более детально как с теоретической, так и с экспериментальной точек зрения. Распределение потенциала может быть определено посредством интеграла, представленного на рис. 5. Решение его дает аксиальное распределение, которое вместе со второй производной от потенциала изображено на рисунке в виде кривой. Отсюда могут быть вычислены траектории электронов посредством известной формулы распространения луча. Нижние кривые изображают траектории электронов, причем одна из них представляет собой траекторию электрона, выходящего из середины катода под некоторым углом к направлению оси, и определяет положение изображения, а другая показывает путь электрона, выходящего из катода с начальной скоростью, равной нулю, на некотором расстоянии от оси, и определяет увеличение системы. Положение изображения определяется расстоянием u между катодом и линией раздела обоих цилиндров, которую мы условно будем называть „линзой“. Зависимость расстояния между линзой и изображением v от u определялась экспериментально с помощью трубки с подвижным катодом и экраном.

Результаты обоих способов измерения представлены в виде кривых на рис. 6, дающих зависимость u от v (выраженных в долях диаметра излучающей электроны поверхности). На этом же рисунке

представлено увеличение m в зависимости от $\frac{v}{2u}$. Из чертежа видно, что в широкой области увеличение m с достаточной точностью определяется соотношением $m = \frac{v}{2u}$. Следует упомянуть, что положение изображения не зависит от разности потенциалов между обоими цилиндрами. Практическим неудобством этой системы является почти полная невозможность сконструировать и расположить цилиндры так, чтобы изображение было абсолютно резким, так как весьма трудно, если не невозможно, изготовить трубку таким образом, чтобы после откачки и отпайки можно было изменять ее

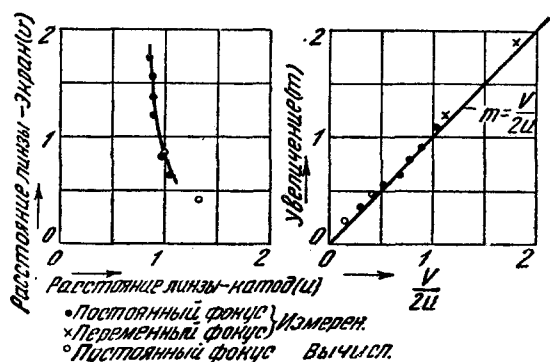


Рис. 6. Зависимость увеличения от размеров трубки

геометрические размеры. Чтобы добиться фокусировки, нужно изменить кривизну эквипотенциальных поверхностей вблизи линзы, не изменяя поле вблизи катода настолько, чтобы увеличилось искажение изображения. Это может быть наилучшим способом достигнуто, если изготовить цилиндр, находящийся между катодом и линзой, из материала с большим сопротивлением так, что по его длине устанавливается известный градиент потенциала. На практике оказалось, что при разделении катодного цилиндра на четыре или больше колец с постепенно повышающимся потенциалом³ искажение изображения получается не большим чем при механической фокусировке трубки. Увеличение этого типа трубок определяется из того же соотношения, что и в предыдущем случае, именно:

$$m = \frac{v}{2u}.$$

Оба типа трубок дают относительно удовлетворительное изображение, если часть используемой поверхности катода невелика. Если это не принято во внимание, то изображение будет отличаться двумя недостатками:

- 1) искривление контуров,

2) действительно резкое изображение может быть получено на экране только для определенного диаметра.

На рис. 7 дана фотография изображения, получаемого на флуоресцирующем экране, если весь катод освещается через прямоугольную сетку. Изображение выглядит на этом рисунке как будто бы вогнутым по направлению к центру линзы. Мы имеем два средства корректирования вышеупомянутых искажений без изменения имеющейся системы линз:

1) образование радиального градиента на катоде,

2) придание соответствующей формы поверхности катода.

Первый метод в настоящее время не имеет особенно большого значения, однако представляет теоретический интерес. Он состоит в том, что прозрачный катодный слой делают обладающим относительно высоким омическим сопротивлением и пропускают ток в радиальном направлении из его середины. Сопротивление слоя обычно не однородно; наименьшее значение его соответствует середине катода, возрастая пропорционально квадрату радиуса в направлении краев. Если середине катода сообщить положительный потенциал и сделать сопротивление точно пропорциональным радиусу, то как искривление контуров, так и явления нерезкости могут быть устранены. Так как, однако, при этом к середине катода должен быть подведен электрический провод, в центре изображения неизбежно появляется пятно.

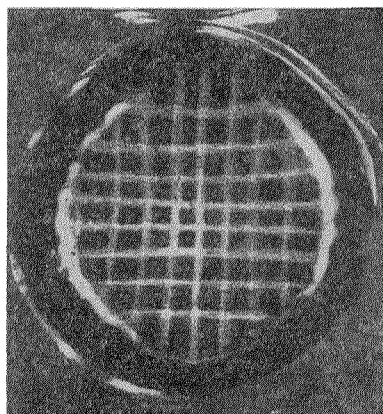


Рис. 7. Искажение изображения, создаваемое электростатической линзой

Интересно отметить, что подобные катоды для определенной освещенности могут быть сделаны самокорректирующимися, если изготовить слой соответственно высокого сопротивления. В этом случае фотоэлектрический ток создает поперек катода падение потенциала так же, как радиальный ток в вышеупомянутом случае. Недостаток этого решения проблемы заключается в том, что коррекция получается полной только для одного определенного значения освещенности и что освещение оптического изображения должно быть приблизительно равномерным.

Второй метод — придание особой формы поверхности катода — значительно практичнее и дает прекрасное изображение на всей поверхности флуоресцирующего экрана. При этом способе коррекции прежде всего можно предположить, что катод должен быть изогнут так, что выпуклая сторона его обращена к линзе, чтобы середина объекта находилась от линзы на более близком расстоянии, чем и достигалось бы корректирование искривления контуров и

искажения поля. Однако основная причина этих искажений является следствием изменения радиусов кривизны эквипотенциальных поверхностей с удалением от оси вблизи плоского катода. При введении выпуклой поверхности этот эффект только усиливается. Если же, наоборот, катод обращен к линзе вогнутой стороной, форма эквипотенциальных поверхностей может быть изменена так, что изображение получается свободным от искажений. На практике, для сферического катода с радиусом кривизны, равным расстоянию до линзы (u), были получены вполне удовлетворительные результаты. На рис. 8 схематически представлена конструкция трубки с изогнутым катодом и concentрирующими кольцами. При этом обяза-

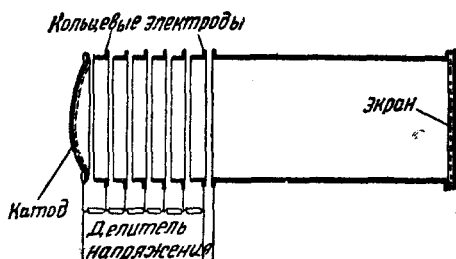


Рис. 8. Электронный преобразователь изображений с постоянным увеличением

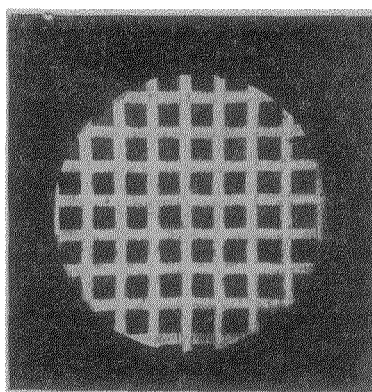


Рис. 9. Улучшение качества электронного изображения путем придания катоду вогнутой формы

тельно делать отдельные выводы для каждого кольца. Вместо этого делитель напряжения, поддерживающий определенные потенциалы на кольцах, может быть введен внутрь самой трубки. Фотография изображения той же сетки, что и на рис. 4, представлена на рис. 9. Из рисунка видно, что изображение повсюду одинаково резко, и искривление контуров исчезающе мало.

До сих пор мы говорили лишь о системах линз без апертурной диафрагмы. Хотя присутствие апертурной диафрагмы несколько усложняет форму образующего электронную линзу электростатического поля, известные общие характеристики остаются прежними. Поле, как и прежде, остается аксиально симметричным, система линз в целом остается положительной и дает действительное изображение и, наконец, в случае если используется некоррегированная трубка, возникают те же искажения изображения, что и в вышеописанных трубках. Три способа расположения апертурных диафрагм в описанной выше трубке представлены на рис. 10. Первая из этих конструкций содержит две симметричные диафрагмы. Для этой системы, как и в предыдущем случае, увеличение оказывается

равным $m = \frac{v}{2u}$. Фокусное расстояние, однако, при данном отношении $V_1 : V_2$ делается короче, т. е. практически разность потенциалов между анодным цилиндром и последним концентрирующим кольцом может быть сделана меньшей. Это обстоятельство облегчает проблему изоляции и уменьшает опасность возникновения разряда между электродами.

Если апертурные диафрагмы несимметричны, то увеличение уже не удовлетворяет равенству $m = \frac{v}{2u}$. Если диафрагма анодного

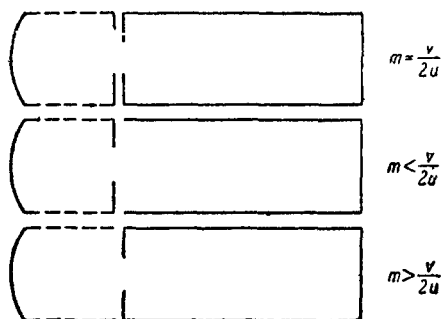


Рис. 10. Способы расположения диафрагмы в электронном преобразователе изображений

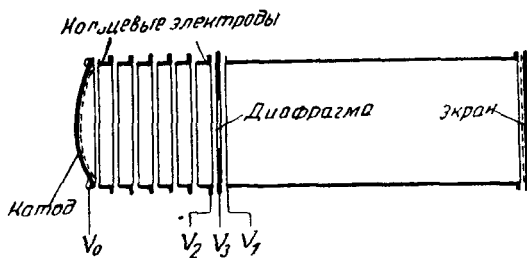


Рис. 11. Электронный преобразователь изображений с переменным увеличением

цилиндра меньше диафрагмы последнего концентрирующего кольца, то увеличение больше, чем следует из предыдущего уравнения, в то время как для случая, когда наибольшей является анодная диафрагма, увеличение получается меньше. Использование несимметричных апертурных диафрагм допускает возможность большего разнообразия в работе трубок. Последний, подвергавшийся исследованию случай, представлен на рис. 11. В этой системе линз апертурная диафрагма помещена посредине между анодным цилиндром

и последним концентрирующим кольцом, причем потенциал ее V_3 может по желанию изменяться. Необходимо отметить, что в случае, если апертурная диафрагма и анодный цилиндр находятся при одинаковом потенциале V_3 , условия будут аналогичны вышеописанному случаю, в котором анодная диафрагма меньше диафрагмы фокусирующего кольца, и увеличение получается больше, чем $\frac{v}{2u}$. Подоб-

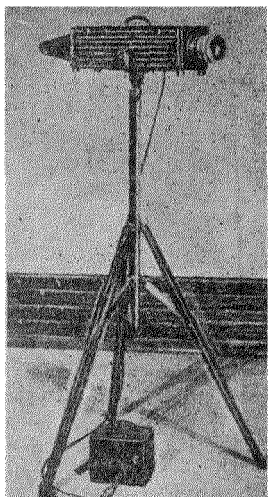


Рис. 12. Конструкция электронной зрительной трубы

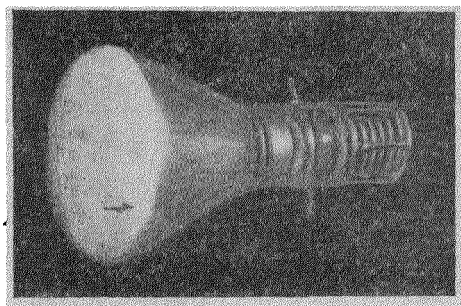


Рис. 13. Электронный преобразователь изображений

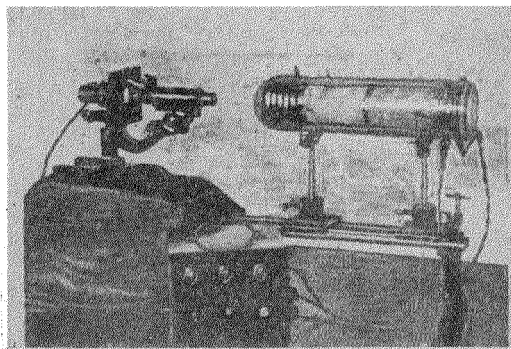


Рис. 14. Установка для инфракрасной микроскопии

ным же образом увеличение получается минимальным, если потенциал V_3 становится равным потенциалу кольца.

Для промежуточных значений потенциала V_3 увеличение лежит между этими предельными значениями.

Искривление контуров получается наибольшим при V_3 , равном или меньшем потенциала кольца; однако с увеличением V_3 этот эффект быстро ослабевает, стремясь к некоторому постоянному значению. Это искажение почти полностью корректируется во всей области увеличения посредством изогнутого катода.

Описанная конструкция позволяет осуществить трубку, дающую вполне удовлетворительное изображение, причем увеличение может по желанию изменяться. Интересным практическим применением этого типа трубок является электронный телескоп (рис. 12).

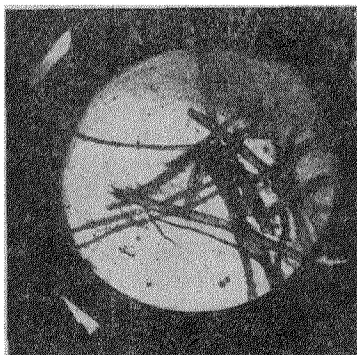


Рис. 15. Изображение волокон растений, полученное в инфракрасном свете



Рис. 16. Электронное изображение фильма, освещенного инфракрасным светом

Объектив, большого отверстия, располагается так, что картина, на которую направлен телескоп, проектируется на катод трубки, чувствительной к инфракрасному свету. Электронное изображение, падающее на флуоресцирующий экран, делает инфракрасное изображение видимым. Подобное устройство может применяться для исследования проницаемости тумана и дыма для инфракрасных лучей и использоваться для сигнализации и тому подобных целей.

Другая область применений создается в связи с инфракрасной микроскопией. На рис. 14 представлены трубка и микроскоп для исследований в инфракрасном свете. Изображение микроскопического препарата на флуоресцирующем экране приведено на рис. 15 (волока растений).

Следующие два рисунка (рис. 16 и 17) дают фотографии флуоресцирующего экрана при проектировании на катод инфракрасного изображения. Как видно из этих рисунков, изображение получается вполне четким.



Рис. 17. Электронное изображение фильма, освещенного инфракрасным светом

II. ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (УМНОЖИТЕЛЕЙ)

Мы рассмотрим теперь другую область применения электронной оптики, не относящуюся к использованию ее как средства получения изображения, в которой, однако, электронная оптика играет чрезвычайно большую роль. Этой областью являются вторично-электронные преобразователи. При этом большее значение следует придавать общему принципу и способу работы преобразователей; однако важность электронной оптики в этой проблеме самоочевидна.

Уже много лет назад стало известно, что определенные поверхности при бомбардировке их катодными лучами эмитируют электроны. Этот эффект, известный под названием вторичной эмиссии, был уже сравнительно давно подробно изучен рядом исследователей, как то: Ленардом, Хэллом, Байером и другими.

Изучение этого явления показало, что число эмитируемых вторичных электронов пропорционально числу падающих (первичных) электронов, причем коэффициент пропорциональности колеблется от величин, меньших единицы, до 10. Величина этого отношения зависит от используемой поверхности и от скорости бомбардирующих электронов. Несмотря на то, что этот эффект известен уже давно, он до сих пор не находил практического применения, за исключением лишь изобретенного Хэллом динатрона. Фактически вторичная эмиссия рассматривалась, главным образом, как существенное затруднение при проектировании электронных ламп, и предпринимался целый ряд исследований с целью ее уничтожения или, по крайней мере, уменьшения. В течение последних 15 лет было обнаружено, что вторичная эмиссия может быть использована для усиления весьма слабых токов, и целый ряд исследователей занялся разработкой этой проблемы. Патенты методов, реализующих эту идею, были предложены уже в 1919 г. Слепяном и позднее — Джервисом и Блейром, Ямсом, Фарнсвортом и другими.

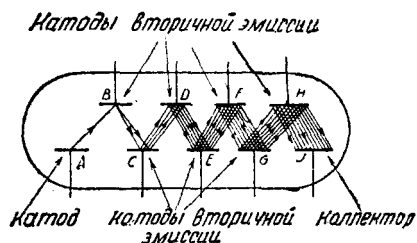


Рис. 18. Схема электронного умножителя

Основной принцип работы вторично-электронных преобразователей состоит в следующем: поток первичных электронов направляется на поверхность, специально активированную в целях получения высокой вторичной эмиссии. Излучаемые этой поверхностью вторичные электроны направляются на следующую поверхность, вызывают там, в свою очередь, вторичную эмиссию и т. д. Процесс этот может повторяться желаемое число раз. Пояснение этого процесса дает рис. 18. Электроды A, B, C, и т. д. представляют собой плоские поверхности с высоким коэффициентом вторичной эмиссии. На эти электроды накладываются постепенно возрастаю-

щие положительные потенциалы. Усиливаемый электронный ток направляется на пластинку А, на которой освобождаются вторичные электроны, идущие к пластинке В. Здесь, в свою очередь, освобождаются вторичные электроны, идущие к пластинке С, и т. д. После того как этот процесс повторился достаточное для получения требуемого общего усиления число раз, эмитируемые последней пластинкой электроны улавливаются собирающим электродом О. Если на каждом каскаде число вторичных электронов на один первичный будет σ , а общее число каскадов будет n , то удвоенный ток I_0 даст на выходе ток I , равный:

$$I = I_0 \sigma^n.$$

Таким образом общее усиление пропорционально σ^n . Это указывает, что с увеличением числа каскадов общее усиление растет весьма быстро.

Другой тип вторично-электронных преобразователей был описан Фарнсвортом. В этих преобразователях электроны колеблются между единственной парой электродов, между которыми создается высокочастотное электростатическое поле. В нашей статье из этих двух типов преобразователей будут описаны только статические умножители, использующие следующие друг за другом катоды вторичной эмиссии, так как эти преобразователи допускают надежную регулировку и обладают весьма значительной стабильностью в работе.

Проблема построения преобразователя с большим коэффициентом полезного действия, однако, вовсе не так проста, как это может показаться на первый взгляд. Построенный согласно рис. 18 преобразователь не давал бы почти никакого эффекта, так как в этом случае практически все электроны, выходящие из пластинки, попадали бы не на следующую пластинку, а пролетали вдоль трубки и улавливались непосредственно собирающим электродом, не создавая на своем пути вторичных электронов. Чтобы построить действительно работающий преобразователь, нужно не только изготовить пластины, обладающие высоким коэффициентом вторичной эмиссии, но также найти средства, позволяющие концентрировать электроны на каждой пластинке и заставляющие выходящие из одной пластины вторичные электроны попасть на следующую.

Прежде чем перейти к разбору специально применяемых в преобразователях методов концентрации электронов, необходимо рассмотреть некоторые основные принципы работы статических преобразователей.

А. Общие соображения

1. Вторичная эмиссия

Так как успешная работа подобных преобразователей зависит от высокой вторичной эмиссии пластин, чрезвычайно важно найти наиболее подходящую для этой цели поверхность. При наших поисках хороших источников вторичной эмиссии мы почти не находили поддержки со стороны физиков-теоретиков.

Теория вторичной эмиссии с точки зрения квантовой механики была опубликована в 1932 г. Фрелихом. В этой работе вычисляется вероятность обмена энергии между проникающим в металл первичным электроном и электроном проводимости металла, движущимся в нем в периодическом поле решетки. Обмен этот происходит таким образом, что свободный электрон получает количество движения, достаточное для того, чтобы выйти из металла. Отсюда делается вывод, что наилучшими источниками вторичной эмиссии являются металлы с большой постоянной решетки и с малой работой выхода. Эти выводы справедливы лишь для простых металлических поверхностей.

Экспериментально было найдено, что коэффициент вторичной эмиссии простых металлических поверхностей во всех случаях оказывался ниже, чем для сложных поверхностей, точно так же как и фотоэлектрическая чувствительность. Так как теория вторичной эмиссии не распространяется на эти сложные поверхности, исследования приходится вести более или менее эмпирическим путем, учитывая при этом, что при прочих равных условиях в большинстве случаев поверхность, обладающая малой работой выхода одно-

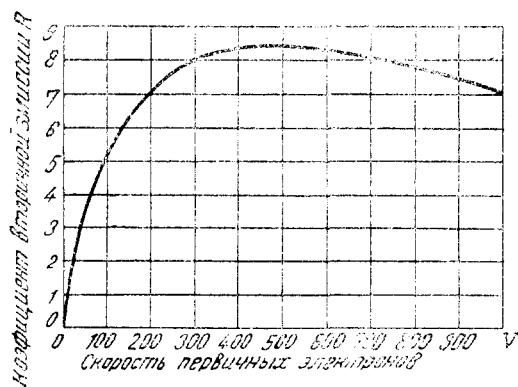


Рис. 19. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от скорости первичных электронов для поверхности $\text{Cs} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Ag}$

временно является хорошим источником вторичной эмиссии. С этой целью было исследовано большое число поверхностей с малой работой выхода, в которых основными металлами являлись Ag , Be , Ta , Ni , Al , Zr , Ca , W и т. д., а поверхностный слой состоял из Na , K , Rb или Cs . Наиболее удовлетворительными из них оказались: оксидированные Ag , Be или Zr с поверхностным слоем из цезия. Максимальный коэффициент вторичной эмиссии для этих поверхностей достигает значения 8—10 при скоростях первичных электронов порядка 400—600 В.

На рис. 19 приведена кривая, изображающая зависимость коэффициента вторичной эмиссии от скорости первичных электронов

для поверхности $\text{Cs} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Ag}$. Эта кривая характерна для поверхностей, часто применяющихся в описываемых ниже преобразователях. Метод изготовления этих поверхностей аналогичен методу, применяемому для изготовления катодов вакуумных цезиевых фотоэлементов.

2. Коэффициент полезного действия преобразователей

Коэффициент полезного действия вторично-электронных преобразователей может быть определен с двух точек зрения. С одной стороны, коэффициент полезного действия катода вторичной эмиссии можно выражать так же, как и для любого источника электронов,

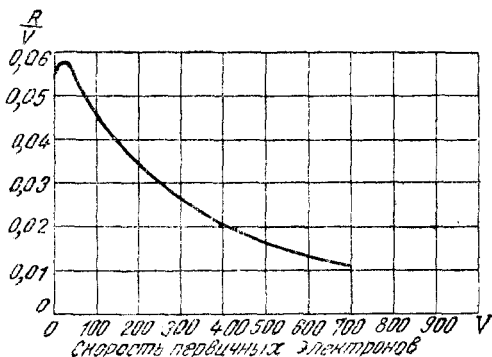


Рис. 20. К. п. д. слоя $\text{Cs} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Ag}$ в А/В

в амперах на ватт потребляемой мощности. С другой стороны, можно рассматривать усиление, достигаемое при данном общем напряжении как функцию числа каскадов или как функцию напряжения на каждом каскаде. Из этих двух определений второе является более важным с практической точки зрения. Однако все же следует разобрать их оба. Из кривой, приведенной на рис. 19, легко может быть вычислена и построена кривая зависимости усиления на один вольт, или выхода электронов в тА, от скорости (в вольтах) первичных электронов (рис. 20). Эта кривая показывает, что максимум коэффициента полезного действия лежит около 30 V и соответствует 60 тА/В. Далее кривая спадает до 45 тА/В при 100 V и до 17 тА/В при 500 V. Для сравнения можно упомянуть, что хороший торированный вольфрамовый катод дает от 55 до 75 тА/В, в то время как хороший оксидный катод дает до 100 тА/В.

Вопрос общего усиления становится яснее из рассмотрения рис. 21. Изображенное на нем семейство кривых дает усиление, получаемое в многокаскадных преобразователях в функции от напряжения. Эти кривые показывают, что наилучшие условия работы

преобразователя соответствуют напряжению 40—50 В на каждом каскаде. При надлежащем числе каскадов могут быть достигнуты весьма большие значения коэффициента полезного действия. Примером может служить 10-каскадный преобразователь, дающий при

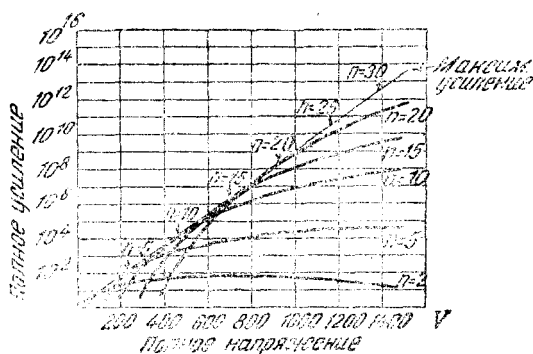


Рис. 21. Зависимость коэффициента усиления электронного умножителя от общего напряжения и числа каскадов

напряжении 500 В усиление порядка 30 000, тогда как 15-каскадный усилитель при 800 В усиливает первичный ток в 10^6 раз. Следует заметить, что приведенные на рис. 21 значения общего напряжения не включают напряжения между собирающим электродом и последней пластиной, так как это последнее зависит от той цели, для которой предназначается трубка.

3. Уровень помех на выходе вторично-электронного преобразователя

Приступая к обсуждению вопроса об уровне помех, ставящих предел усилению вторично-электронных преобразователей, нужно, главным образом, иметь в виду статистические колебания электронного тока в трубке. Из теоретических соображений, подтвержденных экспериментом, следует, что отношение сигнала к уровню помех, достигаемому при усилении, практически определяется шрот-эффектом в первичном фототок.

Далее, два других явления также ограничивают чувствительность этих преобразователей. Сюда относятся: 1) термоэлектронная эмиссия катодов вторичной эмиссии и 2) помехи, вызываемые эмиссией положительных ионов. Оба эти создающие помехи фактора могут быть скомпенсированы, если будут приняты соответствующие меры. Вообще, следует отметить, что шрот-эффект является наиболее существенным ограничением чувствительности вторично-электронных преобразователей. При низких освещенностях выигрыш в отношении сигнала к уровню помех получается от 60

то 200 кратным по сравнению с обычными усилителями при нормальном рабочем режиме.

4. Зависимость от частоты

Частотная характеристика вторично-электронных преобразователей в широком интервале идет параллельно оси частот.

В. Магнитные вторично-электронные преобразователи

1. Теория магнитных умножителей

Мы рассмотрим теперь вторично-электронные преобразователи, в которых для фокусировки вторичных электронов на катодах вторичной эмиссии применяется скрещенное магнитное и электростатическое поля. Эта конфигурация полей и электродов была впервые предложена Слепяном в 1919 г. и предназначалась для использования ее в качестве катода, дающего большую силу тока.

Устройство преобразователя, основанного на этом принципе, схематически представлено на рис. 22. Он состоит из двух рядов электродов, из которых нижний ряд представляет собой источники вторичной эмиссии, тогда как верхний служит только для создания

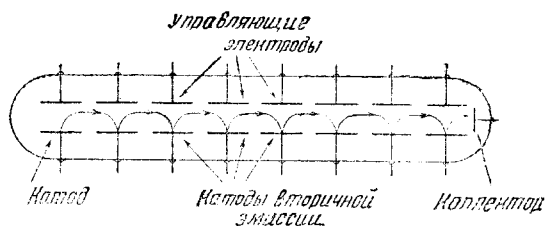


Рис. 22. Магнитный электронный умножитель

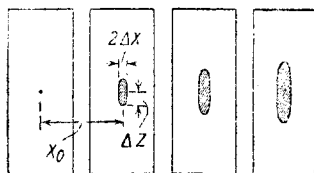


Рис. 23. Дефокусировка пучка электронов в магнитном умножителе

поперечного поля между обоими рядами пластин. Каждая пластина нижнего ряда обладает положительным потенциалом по отношению к предыдущей, так что при попадании на нее электронов, выходящих из предыдущей пластины, она может эмитировать вторичные электроны. Магнитное поле направлено перпендикулярно к оси трубки и к направлению электростатического поля между двумя рядами пластин. Электроны, выходящие из первой пластины, загибаются комбинированными полями так, что попадают на соседнюю пластину, где они выбивают вторичные электроны, которые, в свою очередь, загибаются к следующей пластине, и т. д. вдоль всей трубки.

Под действием обоих полей вторичные электроны отделяются от первичных и фокусируются на соседней пластине. Эту фокусировку можно сравнить с оптической системой цилиндрических линз. Как и в этой системе, концентрация имеет место преимущественно

ственно в одном направлении и совершенно не имеет места в направлении, перпендикулярном первому. Это значит, что электроны, выходящие из какой-либо точки катода, дают на первой пластине пятно эллиптической формы. Это пятно в свою очередь расширяется в еще больший эллипс на втором электроде и далее растет по мере движения электронов вдоль трубки. Этот процесс схематически представлен на рис. 23.

Наконец, пятно становится настолько большим, что некоторые электроны вовсе перестают попадать на пластины, вызывая тем самым понижение коэффициента полезного действия последующих каскадов. Расширение пятна так велико, что если бы не предпринималось специальных мер против подобной деконцентрации, значительные потери возникли бы уже при сравнительно малом числе каскадов.

2. Принцип устройства и изготовления магнитных преобразователей

Схематический чертеж построенного по вышеописанному принципу каскадного фотоэлемента представлен на рис. 24. Фотоэлектроны, выходящие из катода 1а, концентрируются на пластинке 2а. Вторичные электроны, выходящие из этого электрода, концентрируются на пластинке 3а и в свою очередь освобождают там электроны. Этот процесс повторяется столько раз, сколько каскадов имеет данный преобразователь.

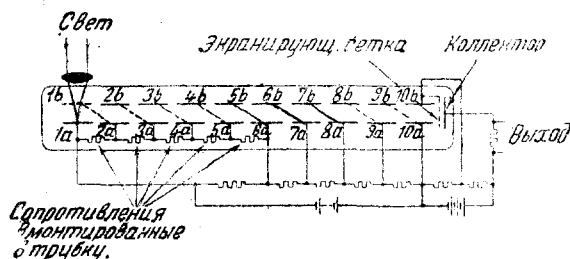


Рис. 24. Магнитный электронный умножитель

Пластины укрепляются внутри трубки таким образом, чтобы верхние и нижние пластины были расположены возможно ближе друг к другу. Делается это с целью увеличения напряженности поля и повышения силы тока с пластины, ограничиваемого пространственным зарядом. Минимальный промежуток составляет половину расстояния между серединами двух соседних пластин. При такой конструкции ток на выходе трубки ограничивается исключительно потерями мощности на конечных каскадах в результате их нагревания под действием падающих на них электронов,

Чтобы ограничить дефокусировку, электроды укрепляются на вертикальных слюдяных полосках. Заряды, скопляющиеся на этих полосках, изменяют поле таким образом, что вызванное им добавочное действие ограничивает дефокусировку. В этом устройстве ограничение для применяемого числа каскадов задается аксиальной деконцентрацией. Эта последняя, однако, настолько мала, что допускает применение весьма большого числа каскадов. Верхняя граница числа каскадов экспериментально не была найдена. Были изготовлены преобразователи более чем с 12 каскадами без заметного уменьшения усиления на каждом каскаде.

Если преобразователь, дающий большое усиление, работает на внешнюю цепь с большим кажущимся сопротивлением, возникают некоторые трудности, связанные с склонностью к генерации. Эта последняя может быть устранена, если перед собирающим электродом поместить экранирующую сетку (рис. 24.) Такая сетка служит электростатическим экраном, препятствующим обратному действию колебаний потенциала коллектора на предыдущие каскады. Характеристика преобразователя превращается, таким образом, из характеристики триода в характеристику тетрода. При работе преобразователя верхние электроды должны поддерживаться при постоянном положительном потенциале относительно соответствующих нижних электродов, причем падение потенциала между соседними электродами должно быть одинаковым. Чтобы сделать число необходимых выводов возможно меньшим, целесообразно связывать верхние электроды с нижними. Удовлетворительные результаты могут быть достигнуты, если связать каждый верхний электрод с последующей нижней пластиной.

Так как в первых каскадах умножителя расход тока ничтожен, их потенциалы могут поддерживаться посредством делителя напряжения сравнительно малых размеров. Чтобы еще более снизить число выводов при большом числе каскадов, целесообразно делитель напряжения, подводимого к первым каскадам, помещать внутри самой трубки.

Преобразователь может работать также и при переменном напряжении на электродах. В этом случае, естественно, трубка будет работать только в течение некоторой части каждого периода. Частота наложенного переменного напряжения должна превышать наивысшую частоту, которую должен воспроизводить преобразователь.

Удовлетворительным средством создания требуемого магнитного поля является использование постоянных магнитов. Эти последние

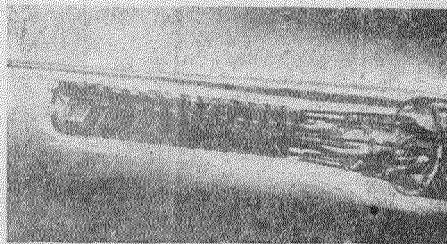


Рис. 25. Конструкция электродов магнитного электронного умножителя

удобнее электромагнитов, так как они меньше по размерам и не требуют постороннего источника тока.

Фотография внутреннего устройства 12-каскадного преобразователя, в котором делитель напряжения для первых 5 каскадов помещен внутри трубки, приведена на рис. 25.

С. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Там, где область применения вторично-электронных преобразователей не допускает применения магнитного поля, приходится пользоваться преобразователями, в которых фокусировка электронов осуществляется исключительно посредством электростатических полей.

Проблемы, возникающие при конструировании фокусирующей системы такого преобразователя, аналогичны проблемам, возникающим при конструировании электронного микроскопа. Оказывается, что в общем случае радиально-симметричное электростатическое поле в области, близкой к оси симметрии, обладает свойствами линзы. Расстояние в радиальном направлении, для которого имеют место эти условия, зависит от конфигурации поля. Фокусировка

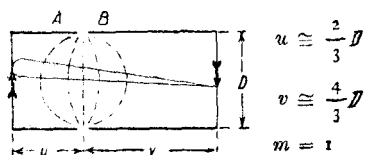


Рис. 26. Электронная линза электростатического умножителя

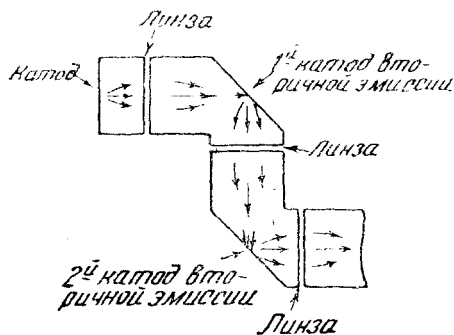


Рис. 27. Расположение электродов в умножителе типа I.

в электростатических преобразователях создается полем между двумя коаксиальными цилиндрами. Так как желательно иметь на трубке по возможности меньше вводов, электроды конструируются так, что один из цилиндров является частью одной из эмитирующих электроны пластин, в то время как другой цилиндр связан со следующей пластиной. Электроды располагаются таким образом, что электроны, выходящие из центральной зоны первой пластины, собираются в центре следующей пластины и что увеличение электронного изображения оказывается равным единице.

Электронно-оптическая система, аналогичная системе, уже описанной в настоящей статье, представлена на рис. 26. На этом чертеже линза образована цилиндрами A и B, причем цилиндр A заземлен, цилиндр B находится при потенциале E. Электроны,

испускаемые катодом A с весьма низкими скоростями, отклоняются линзой между двумя цилиндрами и концентрируются на экране или электроде B , которого они достигают со скоростью равной E вольт.

Использование этой системы приводит к так называемому преобразователю типа L , конструкция которого изображена на рис. 27. В отношении фокусировки этот преобразователь вполне удовлетворителен. Однако вследствие того, что поле, ускоряющее вторичные электроны, выходящие из отдельных пластин, сравнительно слабо, в преобразователе при чрезвычайно малых силах тока возникает пространственный заряд. Далее эмитирующее пятно на первом электроде должно быть мало, так как изображение его имеет те же размеры.

Действие электронного умножителя другой конструкции не зависит в такой сильной степени от резкости изображения. Кроме того, в этой конструкции получаются большие градиенты поля у поверхности катодов вторичной эмиссии. Эта конструкция, представляющая

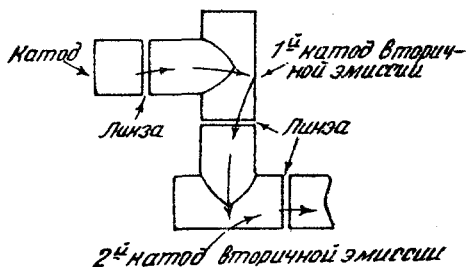


Рис. 28. Расположение электродов в умножителе типа T

собой так называемый тип T , изображена на рис. 28. Преобразователь этот выполнен таким образом, что цилиндрические входные отверстия настолько коротки, насколько это возможно, и все же настолько длинны, что электроны, попадающие в основание буквы T , отклоняются полем следующего электрода не настолько, чтобы вовсе не попасть на испускающую вторичные электроны поверхность. Эмитирующие поверхности изготавливаются таким

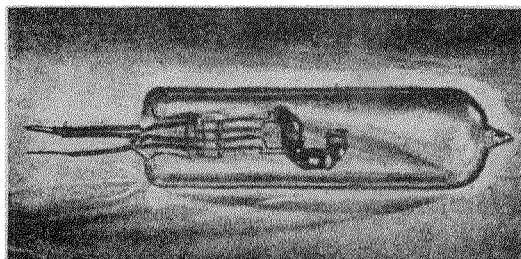


Рис. 29. Внешний вид умножителя типа L

образом, что вся внутренняя сторона цилиндрической поперечной балки буквы T сенсibiliзируется. Для получения токов порядка 1 мА преобразователь этого типа в целях уничтожения пространственного заряда должен работать при весьма высоких потенциалах

на каждом каскаде, именно порядка 200 — 400V. На рис. 29 и 30 представлены каскадные фотоэлементы типов *L* и *T*.

Д. ПРИМЕНЕНИЯ

Наиболее распространенным практическим применением этих преобразователей является усиление фототоков. Эта область применения особенно проста, так как поверхности, обладающие большой вторичной эмиссией, одновременно являются наиболее чувствительными фотокатодами. Для этой цели обычно применяется устройство, использующее комбинированные электростатические и магнитные поля, так как это устройство дает наилучшую концентрацию эле-

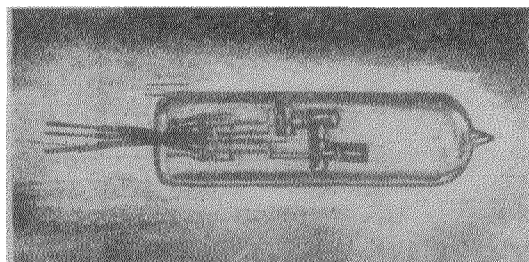


Рис. 30. Внешний вид умножителя типа *T*

ктронов и большую силу тока на выходе. Трубка подобного типа дает усиление порядка нескольких миллионов и обладает чувствительностью 10 A/Lm и более. Размеры ее при этом немногим превышают размеры обычной усилительной лампы. Эти трубки требуют рабочего напряжения порядка 1500 V и, так как они потребляют незначительную силу тока, могут снабжаться цоколем небольших размеров.

Так как вторично-электронный преобразователь заменяет не только фотоэлемент, но и усилитель, с его помощью могут быть достигнуты большое упрощение всего устройства и значительная экономия пространства. Кроме того, эти преобразователи отличаются чрезвычайно большой стабильностью, независимостью от внешних воздействий и хорошей частотной характеристикой. Особенно важным является то обстоятельство, что помехи на выходе определяются исключительно шумом, создаваемым шрот-эффектом на фотокатоде, в результате чего при нормальных условиях отношение величины сигнала к амплитуде помех при малых интенсивностях света увеличивается в 60—100 раз. Все эти качества, вместе взятые, делают этот тип преобразователей наилучшим средством для превращения световых сигналов в электрические. Для сравнения размеров трубки с обычной усилительной лампой на рис. 31 сопоставлены 10-каскадный преобразователь и усилительная лампа типа RCA-59.

Область применения многочасковых фотоэлементов весьма обширна и охватывает звукозапись, передачу изображений, различные контрольные, сигнальные и сортировочные автоматические устройства и т. д.

Хотя в настоящее время наиболее важным техническим применением вторично-электронных преобразователей является каскадный фотоэлемент, существует все же целый ряд других возможностей их использования, приобретающих все большее и большее значение. Вообще говоря, эти преобразователи могут применяться во всех устройствах, в которых подлежащий усилению сигнал является электронный ток. Эта область применения включает как называемые трубки переменного направления, используемые в быстродействующих выключателях, секретной телефонии и умножителях частоты.

В качестве усилителя напряжения этот прибор не может использоваться непосредственно. Для того чтобы связать вход усилителя напряжения с внешним контуром, необходимо применять промежуточное какое-либо сопротивление, ограничивающее в случае обычного лампового усилителя отношение величины сигнала к амплитуде помех. Если в связи с преобразователем используется обычный нагретый катод, снабженный управляющей сеткой, возникают большие трудности, если при этом хочется получить результаты лучшие, чем с помощью обычной вакуумной электронной лампы. Существует возможность получить лучшее направление анодным током, если умозрительно отказаться от использования большей части эмиссионного тока катода, а затем использовать электронный умножитель, чтобы затем снова значительно увеличить среднюю силу тока. Эти эксперименты однако, находятся еще в начальной стадии, и пока еще слишком рано говорить о том, что из них получится.

Вторично-электронный преобразователь является еще слишком новым инструментом, чтобы можно было очертить всю область его применений. Однако уже в настоящее время совершенно очевидно, что он может сделаться серьезным конкурентом электронных ламп в областях, где в течение долгого времени последние занимали исключительное место, а также завоевывать новые области применений.

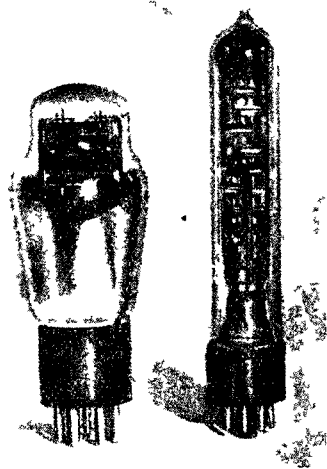


Рис. 31. различия в размерах электронного умножителя и усилителя сигнала

ЛИТЕРАТУРА

1. V. K. Zworykin, J. Inst. Electr. Eng. **73**, 442, October 1933. См. также В. К. Зворыкин, Успехи физ. наук, **14**, 788, 1934.
 2. G. Holst, J. H. de Boer, M. C. Teves и. C. F. Veenemans, Physica **1**, 297, 1934.
 3. M. Knoll, Arch. f. Elektrot., **28**, 7, 1934.
 4. H. Fröhlich, Ann. d. Phys. (5) **13**, 229, 1932.
-

Редактор Э. В. Шнольский.

Техн. редактор В. Н. Диков

ОНИ № 106. Индекс Т-60. Тираж 3575. Сдано в набор 4/VIII 1936
Подп. в печать 26/IX 1936 г. Формат бумаги 62×94 . Уч.-авт. лист.
Бум. лист. $4\frac{3}{8}$. Печатн. знаков в бум. л. 101000. Заказ № 1338. Уполн.
Главл. № В-49308. Выход в свет октябрь 1936 г.

3-я тип. ОНИ им. Бухарина. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.