

ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА

IV. ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. Шаффернихт, Берлин

Содержание: 1. Основа устройства и способ действия преобразователя изображений. 2. Методы получения электроннооптического изображения. 3. Различные преобразователи и их свойства. 4. Применения преобразователя. 5. Выводы.

1. Основа устройства и способ действия преобразователя изображений

Электроннооптический преобразователь изображения служит для превращения световых лучей в электронные. В течение последних десяти лет¹ было много попыток построить такой прибор (см. патенты по телевидению). Решение этой задачи удалось только после развития основных понятий электронной оптики, а также учения о фотоэлектрических слоях. Трансформация световых лучей в электронные имеет двоякое значение: 1. Путем преобразования можно получить увеличение яркости изображения за счет увеличения энергии потока фотоэлектронов; последнее возможно или через увеличение скорости электронов или путем увеличения числа их посредством вторичной эмиссии на очень частой сетке или очень тонкой фольге, помещенной на пути электронных лучей. 2. При-

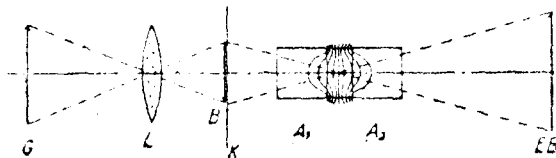


Рис. 1. Схема электроннооптического преобразователя изображений

менение электронных лучей вместо световых позволяет изменить направление луча с помощью поперечных электрических или магнитных полей, расположенных на пути электронного луча. Превращение световых лучей в электронные осуществляется посредством фотоэлектрического слоя следующим способом (рис. 1). При по-

мощи линзы L на полупрозрачный фотоэлектрический катод K проектируется изображение B предмета G . В различных частях катода K вырываются фотоэлектроны, в количестве, соответствующем освещению данного участка; эти электроны ускоряются полем, создаваемым анодными цилиндрами A_1 и A_2 , представленными на рис. 1. Напряжения выбираются так, что электрическое поле, образующееся между A_1 , A_2 и K , действует как электрическая линза и дает изображение предмета в EB . Это изображение может быть также получено с помощью магнитной линзы, помещенной на пути лучей, или в результате совместного действия электрической и магнитной линз. При достаточной однородности катода в EB получается электронное изображение рассматриваемого предмета G . Это электронное изображение может быть использовано двумя способами. В одном случае в EB ставится флуоресцирующий экран, возбуждаемый падающими на него электронами. Таким образом получается видимое глазу электронное изображение. В другом случае в середине EB находится небольшое отверстие, за которым помещается коллектор, причем электронное изображение с помощью двух скрещенных электрических или магнитных поперечных полей

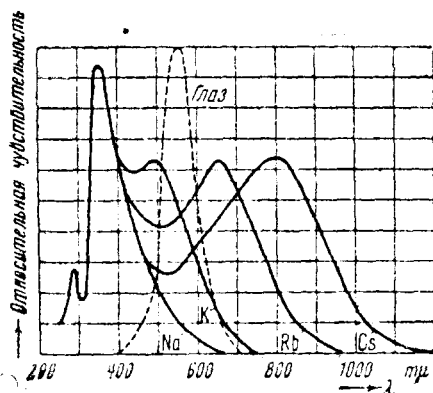


Рис. 2. Ход спектральной чувствительности сложных фотокатодов (по Клюге)

движется известным образом относительно коллектора и последовательно превращается в импульсы тока. Первое устройство называется преобразователем изображения, второе представляет собой часть телевизионной системы, предложенной Фарнвортом (диссектор). Целью развития преобразователей изображений является получение видимых изображений при освещении катода различным по спектральному составу излучением, главным образом невидимым для человеческого глаза — инфракрасным и ультрафиолетовым. Спектральная область определяется распределением по спектру чувствительности применяемого фотоэлектрического слоя.

На рис. 2 представлены кривые спектральной чувствительности употребляемых в настоящее время фотоэлектрических слоев (по

Клюге ²⁾. Кроме того, здесь же нанесена кривая относительной спектральной чувствительности глаза. Из рисунка видно, что наиболее благоприятной кривой спектральной чувствительности обладает слой $\text{Ag} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Cs}$, который отличается большой чувствительностью в инфракрасной части спектра. Требованию высокой чувствительности в ультрафиолетовой части спектра одинаково хорошо удовлетворяют все употребляемые на практике фотоэлектрические слои, так как все они обладают в этой области максимумом чувствительности.

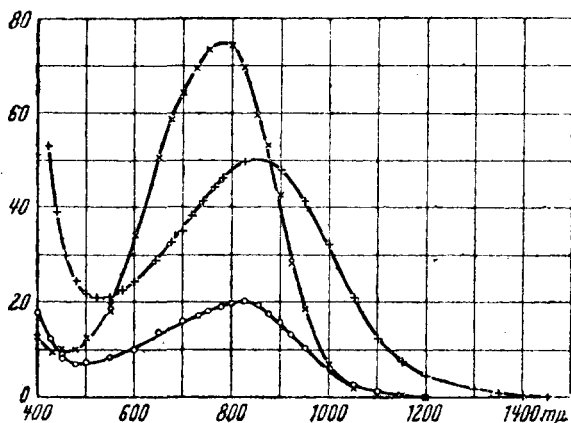


Рис. 3. Положение длинноволнового максимума и порога фотоэффекта для слоя $\text{Ag} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Cs}$ (по Клюге)

Следующий рис. 3 характеризует (по Клюге ³⁾ положение порога фотоэффекта и длинноволнового максимума для слоев $\text{Ag} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Cs}$. Порог фотоэффекта в лучшем случае доходит до 1,4 μ . Флуоресцирующий слой экрана выбирается так, чтобы наибольшая интенсивность излучения приходилась на область оптимальной чувствительности глаза. Получающееся на экране изображение одноцветно, как и всякое изображение, получаемое в телевидении. Цвета передаваемого светового изображения (как и в фотографии) передаются с помощью различных значений яркости светового экрана, причем характер этой передачи зависит от спектральной чувствительности фотоэлектрического слоя катода.

2. Методы получения электроннооптического изображения

После того, как Брюхе ⁴⁾ доказал возможность получения электроннооптического изображения фотоэлектрического катода, началось развитие идеи электроннооптического преобразователя. Пути, приведшие к решению проблемы преобразователя, различаются главным образом по электроннооптическим методам получения изобра-

жений. Прежде чем перейти к рассмотрению этих путей, нужно еще прибавить следующее. В случае идеального электроннооптического изображения все электроны, выходящие из одной точки фотокатода, должны попадать в одну точку флуоресцирующего экрана. Это требование не может быть строго выполнено вследствие того, что электроны, выходящие из фотокатода, имеют некоторые начальные скорости, распределенные по определенному закону. Благодаря наличию этих скоростей, электроны вылетают из одной точки катода во всевозможных направлениях; в результате этого

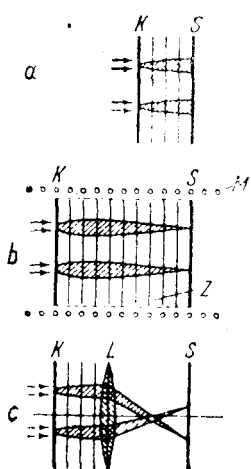


Рис. 4. Методы получения электроннооптического изображения в преобразователях

чаганию фотоснимков в фотоаграфии.

b) Электроннооптическое изображение, получаемое способом, представленным на рис. 4, *b*, положено в основу метода телевидения Фарнsworthа ⁶. Между катодом *K* и анодом *S*, состоящим в данном случае из двух плоско параллельных пластинок, образованы два поперечных магнитных поля, служащих для отклонения электронных лучей. Неоднородность электрического поля, обусловленная большим расстоянием между *K* и *S*, устраняется тем, что *K* и *S* соединены высокоомным полым металлическим цилиндром *Z*, который окружает обе пластинки. По длине цилиндра *Z* существует линейное падение потенциала. Благодаря большому расстоянию между анодом и катодом расхождение пучка электронных лучей практически не позволяет получить изображение без дополнительной фокусировки лучей помощью цилиндрической магнитной катушки. После этих усовершенствований удалось получить на экране *S* точное изображение катода *K*. Изображение получается в данном случае прямое.

с) Третий способ электроннооптического преобразования, пред-

одна точка на фотокатоде отображается на экране как некоторый размытый круг. Эта хроматическая aberrация проявляется поразному в различных преобразователях, которые мы разделим на три принципиально-различные группы (рис. 4):

a) На рис. 4, *a* представлена схема, предложенная Гольстом, де-Буром, Тевесом и Венемансом ⁵. *K* — полупрозрачный катод, *S* — экран, являющийся одновременно полупрозрачным анодом. Катод и анод расположены так близко один к другому, что при наложении напряжения между ними образуется однородное электрическое поле. При этом электроны движутся по параболам от *K* к *S*. Напряжение выбрано настолько высоким, что движение электронов параллельно пластинкам не играет никакой роли. Таким путем на экране *S* возникает изображение, соответствующее световому изображению, спроектированному на катод *K*. В известной степени этот метод соответствует контактному пе-

ставленный на рис. 4, с, является наиболее совершенным. Здесь применяются специальные электронные линзы, которые позволяют получать весьма четкое изображение. Этот способ был впервые указан Полем⁷, превратившим изображение сетки, спроектированной в ультрафиолетовом свете на платиновую фольгу, в соответствующее электронное изображение. Предложение Поля привело к целому ряду преобразователей изображений. Схема этого преобразователя такова: непосредственно у катода имеется ускоряющее электрическое поле, затем следует электрическая или магнитная линза или же комбинация таких линз (L). Такая система аналогична оптической системе, ось которой изображена на рис. 4, с, линией. Увеличение системы зависит от взаимного расположения K , L и S . Точно так же, как и в световой оптике, при использовании электрической линзы получается обратное изображение. При использовании магнитной линзы возникает добавочное вращение изображения, от которого можно избавиться⁸, включив в схему две магнитные катушки, расположенные рядом и несущие токи противоположного направления.

Геннеберг и Рекнагель⁹ сравнили теоретически эти три метода с точки зрения их хроматических свойств. Ими было показано, что две последние системы имеют превосходство перед первой благодаря точной фокусировке. Если обозначить через ε энергию вырывания электронов из фотослоя, V — ускоряющий потенциал, L — расстояние между катодом и экраном и φ — увеличение, то диаметр круга, в который проектируется точка на экране, в этих трех случаях оказывается равным:

$$a) \Delta_1 = 4L_1 \sqrt{\frac{\varepsilon}{U}}; \quad b) \Delta_2 = 2L_2 \frac{\varepsilon}{U}; \quad c) \Delta_3 = 2L_3 \frac{v}{2V} + 1 \cdot \frac{\varepsilon}{U}.$$

При предположениях, соответствующих реально возможному случаю, вычисление этих величин дает следующие значения: $\Delta_1 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ см, $\Delta_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ см, $\Delta_3 = 1,7 \cdot 10^{-3}$ см. Отсюда видно, что наилучшее изображение получается в случае с. Разрешающая способность при этом имеет величину порядка 0,01 м.м. Последнее подтверждается экспериментально.

3. Различные преобразователи и их свойства

Рассмотрим некоторые системы преобразователей. Преобразователь Гольста представляет собой плоскодонный стеклянный дьюаровский сосуд, изображенный на рис. 5. Дно внутренней трубки покрывается слоем $Ag - Cs_2O - Cs$, дно внешней трубки покрывается флуоресцирующим составом и полупрозрачным слоем серебра и служит одновременно анодом и экраном. Наблюдаемый предмет проектируется с помощью линзы на фотокатод, и электронное изображение наблюдается с обратной стороны экрана. Между катодом и анодом накладывается напряжение в 4000 В. Телевизионная трубка Фарнsworthа (рис. 6) состоит из прозрачного катода K ,

ускоряющего анода A , фокусирующей магнитной катушки H и высокоомного металлического цилиндра Z , обеспечивающего однородность электрического поля. Построчное движение электронного изображения относительно отверстия, за которым находится электронный умножитель M , осуществляется с помощью двух взаимноперпендикулярных магнитных отклоняющих катушек. Умножитель M служит для усиления импульсов электронного тока.

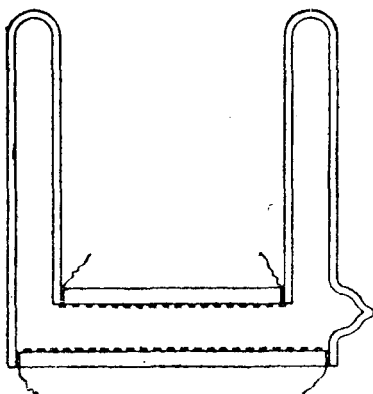


Рис. 5. Преобразователь Гольста, де-Бура, Тевеса и Венеманса

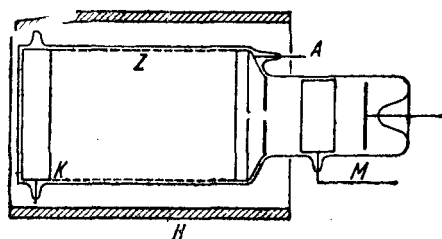


Рис. 6. Телевизионная трубка Фарнсворта

На рис. 7 и 8 сопоставлены различные системы преобразователей. На рис. 7а изображен первый преобразователь Шаффернихта¹⁰. Его основные части: катод K , анод A и экран S , заключенные в высоковакуумной трубке. Световое изображение проектируется на катод и превращается в электронное изображение на флуоресцирующем экране с помощью магнитной и электрической линзы, поле которой изображено на рис. 7, а. Благодаря тому, что катод искривлен, можно получить на всем участке катода изображение, свободное от искажений. Потенциальное поле линзы имеет такую форму, что непосредственно перед катодом оно действует как собирающая линза, за которой следует линза рассеивающая. В дальнейшем оказалось возможным исключить магнитную линзу¹¹.

Оптическая сила системы электрических линз выбирается так, чтобы получить резкое изображение катода на экране. На рис. 7, б дана оптическая аналогия. Оптическая сила положительной линзы растет с кривизной катода; оптическая сила отрицательной линзы при заданном диаметре анодного цилиндра тем меньше, чем дальше расположен цилиндр от катода. Общая оптическая сила системы, как и в оптике, определяется взаимным расположением отрицательной и положительной линз относительно катода. При последовательном расположении положительной и отрицательной линз возникает сильное стягивание электронных лучей, причем пути электронов внутри отдельного пучка оказываются почти параллельными.

Отсюда вытекает, что изображение при различных положениях экрана остается неизменно резким. Таким путем в подобной электроннооптической системе можно изменять увеличение в области от 1:1 до 1:3 без заметных изменений резкости изображения.

Изменяя положение экрана, можно вместе с изменением увеличения изменять поверхностную яркость изображения. Последнее является следствием того, что общий поток энергии электронного излучения, при изменении положения экрана, остается неизменным. Область катода,

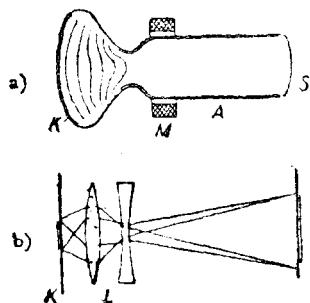


Рис. 7. Преобразователь Шаффернихта

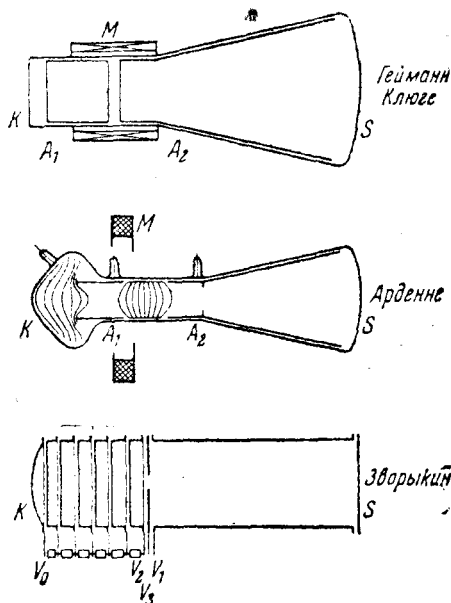


Рис. 8. Преобразователи Геймана и Клюге, Арденне, Зворыкина и Мортонна

изображение которой может быть получено с помощью этой системы, лежит внутри телесного угла, вершина которого находится посередине отрезка, соединяющего обе линзы, и величина которого равна примерно 90° . Такая двухэлектродная система помимо большой простоты обладает еще одним важным преимуществом: получаемое изображение не зависит от величины ускоряющего напряжения между обоими электродами. В системе, состоящей из нескольких электродов, изображение сохраняется только при пропорциональном изменении потенциалов всех электродов, что весьма затруднительно при использовании высоких напряжений. В результате наличия утечек в трубке, наложенные на электроды потенциалы изменяются, вследствие чего появляется расплывчатость электроннооптического изображения.

В приборе Геймана¹² и Клюге¹³ (рис. 8) применяются плоский катод и два анодных цилиндра, имеющие разные потенциалы и образующие электрическую линзу, которая, совместно с вспомогательной магнитной линзой, позволяет получать резкое изображение катода на светящемся экране. Появившийся позднее прибор Арденне¹⁴ состоит, в основном, из тех же частей, что и упомянутые

выше преобразователи. В этом приборе применяются два анодных цилиндра и магнитная катушка. Зворыкин и Мортон¹⁵ используют чисто электрическую систему, состоящую из искривленного катода, кольцевых электродов, одной диафрагмы и анодного цилиндра. При наложении на катод потенциала V_0 на диафрагму, анодный цилиндр и последний кольцевой электрод накладываются напряжения V_2 , V_3 и V_1 , выбираемые так, чтобы в месте расположения диафрагмы образовалась электрическая собирающая линза. Кольцевые электроды служат для улучшения свойств электрической линзы. Этим электродам посредством делителя напряжения сообщаются постепенно повышающиеся потенциалы по отношению к катоду. Наличие делителя напряжения несколько усложняет эту систему.

4. ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время, почти во всех работах по электроннооптическим преобразователям изображений, для характеристики качеств преобразователей приводят электронные изображения проектируемых на катод диапозитивных снимков или сеток.

Хольстом и сотрудниками впервые был указан способ электроннооптического преобразования изображений проектируемых на фотокатод диапозитивных снимков, основанный на использовании однородного электростатического поля. После электроннооптического преобразования путем простого фотографирования светящегося экрана получается снимок (рис. 9). Электронные изображения, получаемые на светящемся экране, обладают еще заметной расплывчатостью, принципиально неизбежной при вышеуказанном методе получения изображений. По расчетам Генненберга и Рекнагеля точка на катоде проектируется на светящийся экран в виде круга диаметром 0,1 мм, что согласуется с данными эксперимента. На рис. 10—12 приведены фотографии, полученные вышеуказанным способом, позволяющие судить о качестве изображений, полученных в электроннооптических преобразователях с электронными линзами. Искажения, имеющие место в преобразователях с плоским катодом, можно видеть на снимке рис. 13, полученном Зворыкиным и Мортоном. Улучшение качества изображения можно получить, применяя искривленный катод и кольцевые электроды (рис. 14). В настоящее время можно сказать, что вопросы электроннооптического преобразования в основном разрешены. Область применения этих приборов определяется их чувствительностью в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра. Чувствительность преобразователя зависит от четырех факторов:

1. От чувствительности фотоэлектрического слоя.
2. От чувствительности светящегося экрана.
3. От величины ускоряющего напряжения.
4. От увеличения, даваемого электроннооптической системой преобразователя.

Обычно применяется фотокатод, состоящий из $\text{Ag} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{Cs}$, который имеет fotocувствительность около 20 $\mu\text{A/Lm}$ (эта чув-

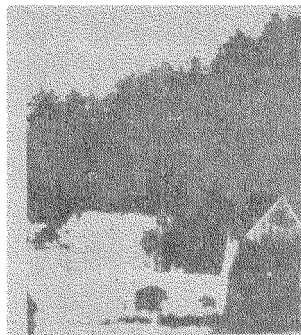


Рис. 9. Электронное изображение, полученное по системе Гольста, де-Бура, Тевеса и Венеманса



Рис. 10. Сравнение изображения, получаемого по схеме Шаффернихта (рис. 7а) и соответствующей фотографии



Рис. 11. Электронное изображение, полученное в приборе Геймана

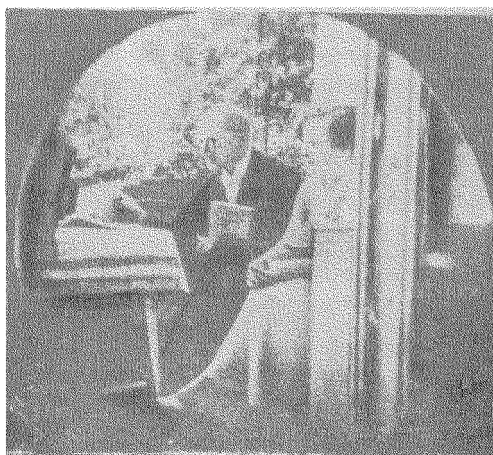


Рис. 12. Электронное изображение, полученное в приборе Шаффернихта (рис. 7, б)

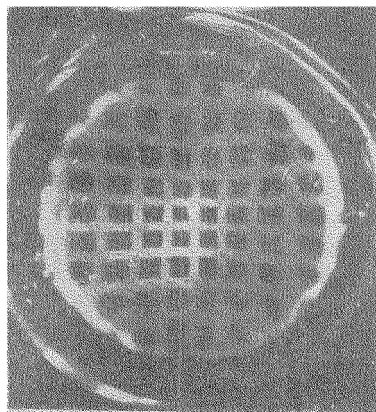


Рис. 13. Искажения изображения сетки при применении электрической электронной линзы (по Зворыкину и Мортону)

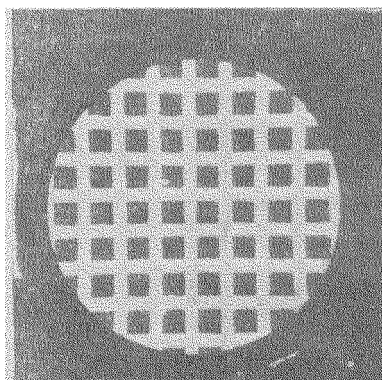


Рис. 14. Улучшение электронного изображения при применении искривленного катода (по Зворыкину и Мортону)

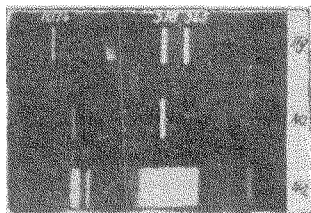


Рис. 16. Видимый и инфракрасный спектры ртутной и натриевой ламп

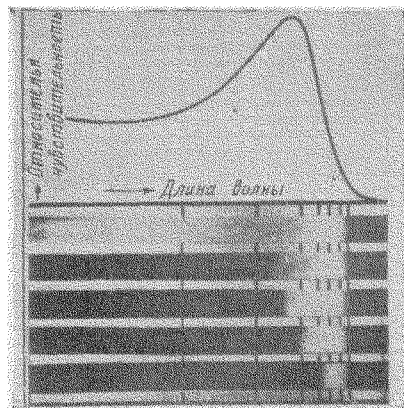


Рис. 17. Кривая спектральной чувствительности фотослоя, или видимый и инфракрасный спектры угольной дуги

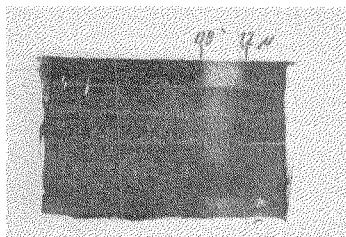
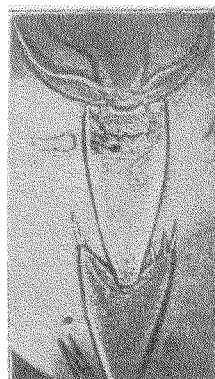
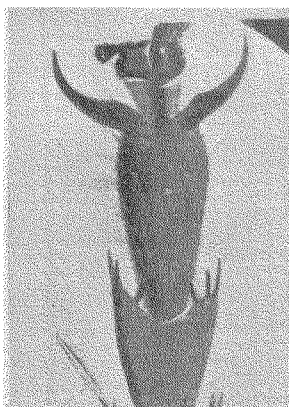


Рис. 18. Абсорбционные спектры, полученные с помощью преобразователя



Световое изображение

Электронное изображение

Рис. 19. Сравнение оптического изображения с электронным, полученным с помощью преобразователя, при наблюдении в инфракрасной части спектра

ствительность определяется при спектральном составе излучения, соответствующем излучению раскаленного тела при температуре 2600°K). Вещество светящегося экрана выбирается так, чтобы экран имел максимальную яркость. Яркость изображения на светящемся экране возрастает линейно (рис. 15) вместе с увеличением ускоряющего напряжения (за исключением области низких напряжений), в области до 80 kV (по данным Шнабеля ¹⁶).

Чувствительность преобразователя зависит также от увеличения изображения, достигаемого электроннооптическими методами вследствие того, что яркость изображения возрастает по мере уменьшения увеличения. При очень большой яркости изображения, получаемого на светящемся экране, возникает опасность оптической обратной связи; это явление заключается в том, что световое излучение попадает на катод и налагается на первичное изображение. Наиболее заметно обратное оптическое действие в приборе Гольста, в котором расстояние между катодом и светящимся экраном очень мало. В тех приборах, где применяются магнитные или электрические линзы, это обратное действие светящегося экрана может быть легко устранено отклонением электронного луча на такой угол, при котором излучение экрана не попадало бы на катод.

Фоточувствительные катоды, применяемые в электроннооптических преобразователях изображений, имеют весьма малую работу выхода, вследствие чего даже при комнатной температуре наблюдается заметный термоэмиссионный ток с катода, создающий на светящемся экране светлый фон. Помехи, создаваемые этим фоном, тем больше, чем меньше яркость получаемого электронного изображения. Для иллюстрации действия электроннооптических преобразователей рассмотрим несколько снимков электронных изображений, полученных в исследовательском институте AEG ¹⁷. На рис. 16—18 представлены результаты различных спектральных исследований, проведенных преимущественно в инфракрасной части спектра. Рис. 16 показывает полученные с помощью преобразователя спектры ртутной и натровой ламп. На рис. 17 дан спектр угольной дуги, снятой с различными инфракрасными светофильтрами.

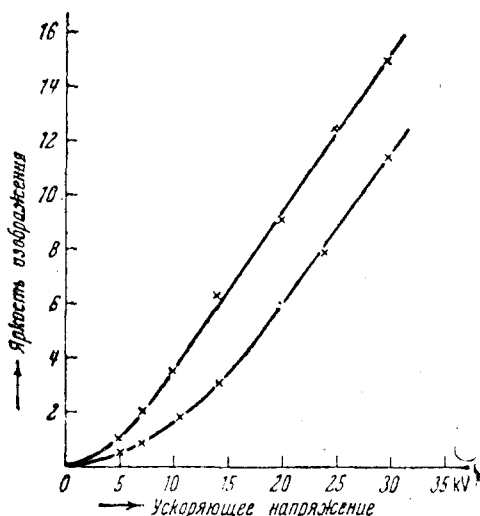


Рис. 15. Зависимость яркости электронного изображения от величины ускоряющего напряжения

Рис. 18 показывает абсорбционные спектры различных органических и неорганических веществ в инфракрасной части спектра (от 0,8 до 1,2 μ). При помощи электроннооптического преобразователя можно производить исследования различных объектов, освещенных ультрафиолетовым или инфракрасным излучением. Это оказывается особенно удобным в тех случаях, когда производится изучение под микроскопом различных насекомых, мельчайших живых существ или процессов, происходящих под пигментным слоем кожи. Освещая исследуемый объект инфракрасными лучами, мы можем наблюдать биологические процессы, происходящие в живых организмах. На рис. 19 в качестве примера такого наблюдения дан микроскопический снимок ножки осы в инфракрасном и видимом свете. Помимо вышеуказанных примеров применений электроннооптического преобразователя, последний может быть использован и для ряда других целей; так например, все объекты инфракрасной фотографии могут наблюдаться также с помощью преобразователя, причем области спектральной чувствительности обоих методов исследования приблизительно одинаковы. Красная граница лежит в среднем около 1,2 μ . Основным преимуществом фотографического метода является его большая (по сравнению с преобразователем) разрешающая способность; основное преимущество преобразователя состоит в том, что исследуемые процессы могут наблюдаться непосредственно в их движении.

ЛИТЕРАТУРА

1. См. E. Brüche u. W. Schaffernicht, *Elektr. Nachr. Techn.*, **12**, 381, 1935.
2. W. Kluge, *Elektrotechn. Z.*, **57**, 145, 1936.
3. W. Kluge, *Z. techn. Phys.*, **16**, 181, 1935; см. также *Успехи физич. наук*, **15**, 1025, 1935.
4. E. Brüche, *Z. Physik*, **83**, 448, 1933.
5. G. Holst, J. H. Boer, M. C. Teves a. C. F. Veenemans, *Physica*, **1**, 297, 1934.
6. P. T. Farnsworth, *J. Frankl. Inst.*, **218**, 411, 1934.
7. J. Pohl, *Z. techn. Phys.*, **15**, 579, 1934.
8. G. Stabenow, *Z. Physik*, **96**, 634, 1935.
9. W. Henneberg u. A. Recknagel, *Z. techn. Phys.*, **16**, 230, 1935.
10. W. Schaffernicht, *Z. Physik*, **93**, 762, 1935.
11. W. Schaffernicht, *Jahrb. d. Forschungs.-Inst. d. AEG*, **4**, 45, 1933/35.
12. W. Heilmann, *Elektr. Nachr. Techn.*, **12**, 68, 1935.
13. W. Kluge, *Z. Physik*, **93**, 789, 1935.
14. M. v. Ardenne, *Elektr. Nachr.-Techn.*, **13**, 230, 1936.
15. V. K. Zworykin a. G. A. Morton, *J. Opt. Soc. Am.*, **26**, 181, 1936; V. K. Zworykin, *Z. techn. Phys.*, **17**, 170, 1936; см. также *Успехи физич. наук*, **16**, 814, 1936.
16. W. Schnabel, *Arch. Elektrotechn.*, **28**, 789, 1934.
17. W. Schaffernicht u. H. Katz, *Z. Physik* (в печати).