

СУРЬМЯНО-ЦЕЗИЕВЫЕ КАТОДЫ И ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Н. С. Хлебников

1. ВВЕДЕНИЕ

С того времени, когда в «Успехах физических наук» было впервые сообщено¹ о сложных фотокатодах нового типа, один из этой группы катодов — сурьмяно-цезиевый катод — был и продолжает оставаться наиболее популярным объектом фотоэлектрических, вторично-эмиссионных и иных исследований. Более того, за указанный промежуток времени этот фотокатод был применён как в обычных фотоэлементах, так и в других фотоэлектрических приборах, в частности в иконоскопах, и сейчас уже можно с полной уверенностью и обоснованностью заявить, что катод этот прочно вошёл в практику и что появление его составило эпоху в технике фотоэлектрических приборов и связанных с ней областях.

Впервые сурьмяно-цезиевые катоды были получены за границей². Однако, заслуга их исследования и внедрения в производство целиком является заслугой советских учёных и инженеров. В этой работе приняло участие значительное количество лиц — как работников научно-исследовательских лабораторий, так и работников промышленности, подходивших к вопросу с самых различных сторон. Это обстоятельство нашло себе выражение, в частности, в программах двух последних совещаний по фотоэффекту и вторичной эмиссии^{3,7} где вопрос о сурьмяно-цезиевых катодах неизменно выделялся в особый и обширный раздел.

Результатом этой разнообразно и широко поставленной работы и явилось то серьёзное достижение, которым следует считать сурьмяно-цезиевые катоды. Сейчас уже время подвести итоги проделанной работе и показать её практически важные результаты. Помимо общего интереса такой обзор имеет значение и для развития дальнейшей работы в этом и близких к нему направлениях.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУРЬМЯНО-ЦЕЗИЕВЫХ ФОТОКАТОДОВ

1. Природа Sb-Cs катодов.

Как известно, в первой публикации Герлиха¹ о новом типе фотокатодов, к которому принадлежит, в частности, сурьмяно-цезиевый катод, более или менее подробно сообщалось только о некоторых фотоэлектрических свойствах — о распределении чувствительности по спектру — и лишь в общих чертах говорилось о других физических особенностях, в частнос-

ти о значительной прозрачности и чувствительности при освещении катода со стороны, обратной его эмитирующей поверхности.

Это явилось следствием того, что Герлих считал сурьмяно-цезиевый слой сплавом двух металлов — цезия и сурьмы, — и истинная природа этого нового материала, а вместе с ней и необычные свойства новых катодов остались для него неясными. Точно так же в первой из опубликованных в нашей печати² работ по сурьмяно-цезиевым катодам, где этот материал а priori рассматривался как сплав, соображения о причинах необычного поведения этих катодов были сведены лишь к тому, что свойства двух металлов, мелко-дисперсно распределённых один в другом, могут не иметь ничего общего с таковыми каждой из компонент.

Достаточно, однако, было отказаться³ от предвзятой (и никак не вытекавшей из самых простых наблюдений над сурьмяно-цезиевыми катодами) мысли, что сочетание двух металлов есть непременно и исключительно сплав (что это не обязательно, было хорошо известно и раньше⁴), как оказалось возможным разъяснить особенности сурьмяно-цезиевых катодов и предсказать ряд их свойств.

Дальнейшее развитие работы в этой области показало полную правильность основных положений, построенных на этой новой концепции сурьмяно-цезиевого катода. Напомним кратко те простые, но в то же время имеющие решающее значение факты, которые послужили отправной точкой для развития современных взглядов на сурьмяно-цезиевый фотокатод.

Процесс образования сурьмяно-цезиевого слоя состоит обычно в нанесении на стенку эвакуированного сосуда слоя сурьмы (испарением в вакууме) и в обработке этого слоя парами цезия при температуре $\sim 200^\circ$, причём эти операции можно чередовать несколько раз. В результате такой обработки исходный слой сурьмы, представляющий собой чистое металлическое зеркало и (если он не слишком толст) имеющий при рассматривании на просвет лиловатую окраску, совершенно меняет свои свойства. Он утрачивает металлический блеск и сильно увеличивает свою прозрачность для длинноволнового излучения, вследствие чего кажется теперь на просвет жёлтым, оранжевым или рубиново- или вишнёво-красным, в зависимости от толщины слоя. Одновременно с изменениями оптических свойств происходит сильное увеличение его сопротивления, возрастающего примерно в 10^5 раз. Наконец, как оказывается, сурьмяно-цезиевый слой имеет в отличие от металлов большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Все эти факты можно объяснить, лишь предположив⁵, что, во-первых, сурьмяно-цезиевый слой представляет собой не сплав, а соединение, и во-вторых, что это соединение является полупроводником. В пользу того, что это сурьмяно-цезиевый слой представляет собой химическое соединение, говорит ещё ряд данных. Во-первых, известно, что сурьма обладает отрицательными валентностями и даёт с водородом соединения SbH_2 и SbH_3 ; известны также соединения сурьмы с такими металлами, как Ni, Cu, Ag, где Sb играет роль металлоида. Далее, было установлено, что этот катод в процессе обработки цезием ведёт себя совершенно иначе, чем обычные сложные фотокатоды типа кислородно-серебряно-цезиевых. Это различие поясняется рис. 1, где кривая I схематически изображает ход изменения

фоточувствительности¹⁾ кислородно-серебряно-цезиевого катода в зависимости от времени поступления цезия на поверхность окисленного серебра, а кривая 2 — ту же зависимость для сурьмяно-цезиевого катода. В этом случае при обычных температурах образования слоя ($\sim 200^\circ$) термоэлектронный ток почти незаметен по причине относительно высокой работы выхода этих катодов. Сравнение этих кривых показывает, что в то время как для кислородно-серебряно-цезиевого катода содержание цезия в нём (определяющее фоточувствительность) является произвольным в том смысле, что зависит от внешних факторов (время обработки парами цезия), для сурьмяно-цезиевого катода эта зависимость существует лишь до определённого момента — до тех пор, пока катод не приобрёл максимальной чувствительности. В дальнейшем поступающий вновь цезий остаётся в некоем динамическом равновесии со слоем и на его фоточувствительность не влияет. (Здесь надо оговориться, что таково положение при том необходимом условии, что исключена возможность конденсации цезия на поверхности катода; если этого нет, то чувствительность катода падает, приближаясь к чувствительности массивного цезия; это понижение чувствительности, однако, в отличие от такового для кислородно-серебряно-цезиевого катода, в значительной степени обратимо.) Таким образом, слой сурьмы может поглотить лишь некоторое определённое количество цезия; очевидно, то, которое соответствует стехиометрическому составу соединения этих двух металлов.

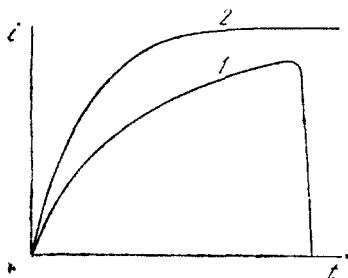


Рис. 1. Кривые изменения чувствительности кислородно-серебряно-цезиевого (1) и сурьмяно-цезиевого (2) фотоэлементов в зависимости от времени обработки парами цезия

Непосредственный опыт⁶, состоявший в определении количеств Sb и Cs, образующих фотокатод, показал, что это действительно так. Количество Sb определялось заранее (нацело испарялась определённая навеска этого металла), а количество цезия находилось титрованием щёлочного раствора (CsOH), полученного после вскрытия колбы фотоэлемента и промывания её водой. Ряд определений по этому способу дал для отношения чисел атомов Cs и Sb цифры, лежавшие в пределах от 3,1 до 3,2. Это показало, что для сурьмяно-цезиевого слоя должна быть принята формула SbCs_3 . Избыток цезия, помимо ошибок в определениях, должен быть отнесён за счёт наличия в таком катоде кроме химически связанного ещё и свободного цезия, существующего в виде поверхностно адсорбированной плёнки, а также и в толще катода (в последнее время получило распространение мнение⁷, что этот цезий распределён внутри катода в виде внутренне-адсорбированных атомов). Более поздние определения⁸, произведённые другими, более сложными методами, дали для отношений чисел атомов цезия и сурьмы 5,5 (первый метод) и 4,5 (второй метод). Это заставляет авторов цитированного исследования⁸ считать, что в Sb-Cs катоде

¹⁾ Как известно в общем тот же ход обнаруживает и термоэлектронный ток.

не существует определённого стехиометрического соотношения между количествами обоих металлов. Однако, поскольку пятью строками ниже они высказываются за то, что SbCs -слой есть соединение SbCs_3 , можно думать, что и по их мнению дело здесь заключается в ошибках, допущенных при химическом анализе.

Во всяком случае, сейчас нет никаких сомнений в том, что сурьмяно-цезиевый фотокатод представляет собой полупроводник. Одним из наиболее убедительных доказательств в пользу этого взгляда является обнаруженное ещё давно³ сильное возрастание его проводимости с температурой. Температурная зависимость сопротивления этих слоёв была количественно исследована за последнее время, и хотя цифровые данные разных авторов расходятся между собой довольно значительно, они качественно подтверждают друг друга. Так, установлено, что изменение проводимости с температурой хорошо изображается законом

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{U}{2kT}},$$

где σ — проводимость и U — работа ионизации. Первые определения U были произведены Н. Д. Моргулисом⁹, нашедшим, что $U = 0,3\text{eV}$. Более позднее определение Лукьянова и Мазовера⁸ дало для U значение $0,67\text{eV}^*$). Сейчас нет оснований отдать предпочтение какой-либо из этих цифр, так как они изображают результаты измерений на отдельных образцах катодов. Точно так же не установлена сколько-нибудь точно и величина удельного сопротивления Sb-Cs -слоёв. По данным Моргулиса величина его составляет около $1\Omega \cdot \text{см}$, по данным Лукьянова $\sim 10\Omega \cdot \text{см}$.

Сурьмяно-цезиевый слой представляет собой электронный полупроводник, так как преобладающим типом проводимости в нём является проводимость электронная. Это было недавно непосредственно показано П. Г. Борзяком¹¹ путём определения полярности контакта между Sb-Cs -слоем и металлом при нагревании и освещении его. То же положение высказывалось и раньше³ на основании поведения сурьмяно-цезиевых катодов в отношении фотоэлектрического утомления.

2. Внутренний фотоэффект сурьмяно цезиевых катодов

В первой из работ, где была сделана попытка истолкования механизма действия сурьмяно-цезиевых катодов², было высказано мнение, что их значительная интегральная чувствительность и высокий квантовый выход обусловлены весьма сильным поглощением света в самом поверхностном слое катода. Это мнение также принудительным образом вытекало из представления о сурьмяно-цезиевом катоде как о сплаве или мелкодисперсной смеси двух металлов. Однако, ряд простейших наблюдений³ показывал, что это не так.

Прежде всего неизменно обнаруживалось, что чувствительность сурьмяно-цезиевого катода (при прямом освещении) оказывается выше в

*) В последней работе Н. Д. Моргулиса и Б. И. Дятловицкой¹⁰ авторы дают для интервала температур от 90 до 290°K для U значение в $0,28\text{eV}$; для интервала от 290 до 400°K $U \gtrsim 0,8\text{eV}$.

случае более толстых слоёв. Из этого обстоятельства следовало, как одно из возможных, заключение, что в тонких слоях поглощается меньшая часть активного света. Это вполне согласуется с характером изменения сопротивления $Sb-Cs$ -слоёв, в зависимости от толщины, и с видом их спектральных характеристик. Далее, о том же говорили кривые зависимости чувствительности от толщины слоя для прямого и обратного освещений, снятые на сурьмяно-цезиевом клине¹². Эти кривые прямо показывали, что затеняющая область фотокатода имеет толщину, много большую одноатомной. Наконец, трудно было представить себе, что квантовый выход катодов, ещё по данным Герлиха¹ в несколько раз превышавший таковой для всех прочих катодов, мог являться следствием фотоэлектрического поглощения света только в самом поверхностном слое катода.

Таким образом, освобождение фотоэлектронов в случае этих катодов должно было иметь место в слое значительной толщины, и по-этому часть этих электронов могла не покидать катода, это значило, что $Sb-Cs$ -слои должны обнаруживать изменение проводимости под влиянием освещения, т. е. внутренний фотоэффект. Такие изменения проводимости действительно были обнаружены уже в первых исследованиях^{2,3}, но некоторые авторы² приписывали их так называемому «скользящему фототоку». Причиной этого заблуждения были дефекты методики эксперимента, в своё время разъяснённые³.

Изменения проводимости под влиянием освещения у $Sb-Cs$ -катода при обычных условиях (комнатная температура) невелики благодаря тому, что эти слои обладают значительной собственной проводимостью, мешающей изменению, возникающие под действием света. Вследствие этого внутренний фотоэффект $Sb-Cs$ -слоёв лучше наблюдать при низких температурах. Наиболее непосредственное доказательство того, что фотопроводимость в $Sb-Cs$ -катадах существует как таковая, а не есть следствие наличия внешнего фотоэффекта («скользящий фототок»), заключалось в наблюдении изменения сопротивления катода и величины внешнего фотоэффекта при освещении через красный светофильтр³. Эти наблюдения показали, что в то время как такое освещение даёт увеличение внешнего фототока на 1—20%, изменения сопротивления слоя (при тех же условиях освещения и температуры) достигают 20—30%.

Более подробное исследование фотопроводимости $Sb-Cs$ -слоёв было проделано недавно П. Г. Борзяком¹¹ при температуре жидкого воздуха. Схема прибора, с которым производились эти опыты, изображена на рис. 2. Прибор представлял собой стеклянную трубку около 20 мм диаметром, на участок внутренней поверхности которой наносились два (отделённые друг от друга полосками непокрытой поверхности стекла) электрода E_1 и E_2 . Из вольфрамовой спирали S путём испарения наносился слой сурьмы, перекрывавший один из промежутков между электродами. Эта сурьма обычным образом обрабатывалась парами цезия. Измерения фотопроводимости производились с прибором, погружённым в жидкий

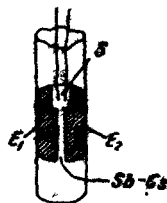


Рис. 2. Схема прибора, с помощью которого П. Г. Борзяк исследовал фотопроводимость $Sb-Cs$ -слоёв

воздух, когда сурьмяно-цезиевый слой имеет ничтожную проводимость и, следовательно, её маскирующий эффект отсутствует.

При интенсивном освещении неразложенным светом лампы накаливания промежутка между электродами Борзяк наблюдал увеличение проводимости между электродами E_1 и E_2 в 10^5 раз. Спектральное распределение чувствительности было обследовано лишь весьма приблизительно (с помощью светофильтров), причём оказалось, что чувствительность существует и в коротковолновой, и в длинноволновой областях видимого спектра.

Проводимость слоя приобретает свою окончательную величину не сразу после включения освещения, но лишь по истечении некоторого времени (во всяком случае, при использовавшемся весьма интенсивном освещении). Точно так же после выключения освещения проводимость падает до начального значения не сразу, лишь постепенно уменьшаясь в течение довольно значительного времени. Можно было бы полагать, что это обстоятельство является следствием того, что освещение слоя вызывает его нагревание, которое сохраняется длительное время. Однако, поскольку время остывания t может быть выражено формулой

$$t \approx \frac{1}{15} \ln \frac{T_0}{T},$$

где T_0 — начальная температура слоя и T — температура в момент t , то температура уже за $\frac{1}{15}$ сек. должна уменьшиться в e раз. Столь быстрое понижение температуры не позволяет объяснить значительно более медленное уменьшение проводимости. Для того, чтобы вернуть плёнку к исходному состоянию быстро, необходимо вынуть её из жидкого воздуха (нагреть) и затем снова охладить, не подвергая освещению. Весьма интересно также, что и в случае освещения плёнки без наложения разности потенциалов остаточная проводимость существует.

Всё это можно, повидимому, объяснить, как это сделал Борзяк, малой вероятностью обратных термических переходов электронов из зоны проводимости (вследствие слишком большой энергии активации) при температуре жидкого воздуха, хотя длительное сохранение проводимости по данным П. С. Тартаковского может иметь своей причиной и другое явление — объёмные заряды.

Каков бы ни был механизм фотопроводимости Sb-Cs-катодов, сейчас имеется ещё слишком мало данных, чтобы судить об этом с достоверностью — описанные опыты П. Г. Борзяка с полной несомненностью и наглядностью показывают, что фотопроводимость у Sb-Cs-катодов существует. С помощью того же прибора Борзяк показал упомянутым выше образом, что проводимость Sb-Cs-слоев имеет электронный характер.

3. Внешний фотоэффект Sb-Cs-катодов

Как уже отмечалось выше, в первых работах по сурьмяно-цезиевым катодам, за исключением одной, принималось, что фотоэффект этих катодов имеет чисто поверхностный характер. Наиболее полное выражение эта точка зрения нашла в чрезвычайно интересной и ценной работе С. С. При-

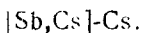
лежаева¹³, подробно исследовавшего влияние состояния поверхности сурьмяно-цезиевого катода на его чувствительность, распределение чувствительности по спектру, а также распределение фотоэлектронов по энергиям.

Основные результаты этой работы заключаются в установлении того факта, что чувствительность (интегральная) этого катода определяется (в интервале температур до 200°) величиной работы выхода, в свою очередь зависящей от степени покрытия поверхности адсорбированными атомами цезия, т. е. в конечном счёте от температуры поверхности и давления паров цезия над ней, поскольку этими факторами определяется состояние динамического равновесия между адсорбированной плёнкой и паром. Для зависимости фототока i_S от работы выхода φ Прилежаев даёт следующую эмпирическую формулу:

$$\lg i_S = B_1 - B_2 \varphi,$$

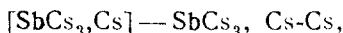
где B_1 и B_2 — константы, зависящие от спектрального состава излучения. Несмотря на большой интерес и высокую практическую ценность этой работы в отношении создания рациональной технологии сурьмяно-цезиевых катодов, её нельзя считать исчерпывающей вопрос о механизме их действия и нельзя согласиться с некоторыми выводами автора.

Так, например, нам кажется несомненным, что сурьмяно-цезиевый катод нельзя считать, как это делает Прилежаев, принадлежащим к группе [W]-Cs, [W]-Ba, [W]-Th и им подобных катодов, и нельзя принять для него в транскрипции де-Бура¹⁴ формулу



В самом деле, катоду, обозначаемому таким образом, приписывается вполне определённый механизм эмиссии: вырывание электронов проводимости в основном из поля поверхностного потенциального барьера подкладки (основного металла), причём роль внешней адсорбированной плёнки заключается почти исключительно в понижении работы выхода. Как известно¹⁵, такие катоды отличаются малыми значениями квантового выхода (порядка долей процента), тогда как для Sb-Cs-катода эта величина составляет (см. далее) 25—30%. Мы имеем здесь не более чем ограниченную аналогию, относящуюся, вероятно, лишь к структуре внешней поверхности катодов, и неверно возводить эту аналогию в ранг тождества, тем более что принципиально неправильно стремиться втиснуть новое явление в рамки уже известных вещей.

Имея в виду, что полупроводниковая природа Sb-Cs-катода является в настоящее время уже твёрдо установленным фактом, а также, что величина квантового выхода может быть понята, лишь если рассматривать внешний фотоэффект в этом случае как объёмный, нам кажется правильной следующая формула для Sb-Cs-катода:



которая находится также в согласии с фактами наличия определённого стехиометрического состава и избыточного количества цезия.

Точно так же, принимая во внимание полупроводниковую природу Sb-Cs слоя и объёмный характер фотоэффекта, нам не кажется достаточным объяснение С. С. Прилежаевым различий в распределении электронов

по энергиям для Sb-Cs-катодов и металлов тем, что в Sb-Cs-катоде распределение электронов отличается от фермиевского. Во-первых, поскольку этот материал не есть металл, оно уже должно быть нефермиевским, во-вторых, по причине объёмного характера эффекта несомненно, что на форме кривых распределения электронов по энергиям неизбежно должны сказываться процессы рассеяния и поглощения электронов на пути к поверхности. Одним из самых интересных вопросов в отношении Sb-Cs-катодов нам представляется вопрос об эмиссионных центрах в них. Наиболее распространено в настоящее время¹⁶ мнение, что такими центрами являются внутренне адсорбированные в решётке SbCs_3 атомы цезия. По нашему мнению, однако, этот взгляд имеет перед другим¹⁷ (что центрами эмиссии являются молекулы самого соединения SbCs_3) лишь то преимущество, что так обстоит дело в других известных катодах.

Наиболее убедительным аргументом в пользу объёмного характера внешнего фотоэффекта Sb-Cs-катодов являлась и остаётся, несомненно, исключительно большая величина квантового выхода в области селективного максимума спектральной кривой, которую никак нельзя понять, в частности, если ограничиться в отношении механизма действия этих катодов кругом идей, содержащихся в цитированной работе С. С. Прилежаева.

Это обстоятельство послужило стимулом к определению величины квантового выхода различными авторами, использовавшими разные методы. Уже сравнение кривых спектральной чувствительности различных катодов, произведённое в первой работе Герлиха¹, показывало, что Sb-Cs-катод имеет квантовый выход, в несколько раз превышающий таковой для гидридно-калиевого катода, у которого значение этой величины было наибольшим из известных ($2,3\%$). Однако, эти данные Герлиха относились к катодам, видимо обладавшим ещё сравнительно низкой интегральной чувствительностью ($\sim 20\text{--}30 \text{ }\mu\text{A/lm}$). Определения, произведённые косвенным методом Лукьяновым¹⁸ и Гуревичем¹⁹, а также непосредственные измерения, осуществлённые Прилежаевым²⁰, дали для квантового выхода в максимуме кривой спектральной чувствительности значения от 25 (Гуревич, Прилежаев) до 30% (Лукьянов). Эти цифры относятся к катодам с чувствительностью порядка $100 \text{ }\mu\text{A/lm}$ (при цветовой температуре источника в $2800\text{--}2850^\circ\text{K}$).

В связи с этими измерениями нам кажется целесообразным остановиться на косвенном методе определения квантового выхода, применявшегося Лукьяновым и Гуревичем. Этот метод выгодно отличается от непосредственного определения квантового выхода относительной простотой необходимых измерений (нужно знать только кривую распределения чувствительности по спектру, выраженную в относительных единицах, и интегральную чувствительность фотоэлемента при известной температуре источника). Он, тем не менее, не пользуется у нас достаточно широким распространением, несмотря на то, что был предложен сравнительно давно, и на то, что вопрос о величине квантового выхода весьма часто имеет большое значение. Вкратце этот метод состоит в следующем¹).

¹) Ниже мы придерживаемся обозначений, принятых Лукьяновым¹⁸.

Интегральную чувствительность фотокатода I , выраженную, как обычно, в единицах силы тока (амперы), отнесённых к единице светового потока (в люменах), можно представить как отношение двух интегралов

$$I = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_2} i_0(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda}{N \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda} A, \text{ lm},$$

где $i_0(\lambda)$ — абсолютная спектральная чувствительность фотокатода (в амперах на ватт падающей энергии); $E(\lambda, T)$ — спектральная плотность падающего на катод излучения (в произвольных единицах); N — максимальный коэффициент видимости (равный 621 lm/W) и $v(\lambda)$ — коэффициент относительной видимости излучения; λ_0 — длина волны, соответствующая порогу выхода; λ_1 и λ_2 — границы видимого спектра. Так как в обычных измерениях спектральной чувствительности она выражается в относительных единицах, то для использования формулы (1) необходимо заменить $i_0(\lambda)$ через функцию $i(\lambda)$, выражающую спектральную чувствительность в относительных единицах и отличающуюся от $i_0(\lambda)$, очевидно, только постоянным множителем

$$i_0(\lambda) = k_0 i(\lambda). \quad (2)$$

Подставляя $i_0(\lambda)$ из (2) в (1), мы можем найти k_0 :

$$k_0 = N I \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_2} i(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda} A/W. \quad (3)$$

Как легко видеть из (2), величина k_0 численно равна фотоэлектрическому выходу, выраженному в амперах на ватт для значения $\lambda = \lambda_{\text{max}}$ (когда $i(\lambda)$ обращается в единицу). Для определения выхода, выраженного в электронах на квант (квантовый выход), достаточно перейти к другим единицам заряда и энергии. Если положить согласно Лукьянову заряд электрона e равным $4,80 \cdot 10^{-10}$ CGSE и постоянную Планка h равной $6,61 \cdot 10^{-27}$ эрг-сек, то получим:

$$1 \text{ A/W} = 1 \text{ кулон/джоуль} = 1,14 \cdot 10^{-4} \lambda^{-1} \text{ электронов/квант}.$$

Определяя k_0 из (3), выражая λ в ангстремах и I — в микроамперах на люмен, находим для величины квантового выхода в максимуме: $k = 7,73 \lambda^{-1} B \text{ электронов/квант}$, где B обозначает отношение интегралов в формуле (3). Эта величина может быть найдена графическим путём с помощью эмпирической кривой спектральной чувствительности, табличной кривой видимости и кривой спектральной плотности излучения, которая может быть построена по формуле Планка, если известна температура источника излучения. Таким образом, все необходимые измерения сво-

дятся к снятию спектральной кривой и измерению интегральной чувствительности при точно известной температуре источника.

На рис. 3 приведены спектральные кривые сурьмяно-цезиевого (1) и кислородно-серебряно-цезиевого (2) катода с чувствительностью около 80 и 60 $\mu\text{A}/\text{lm}$ соответственно. Это — кривые, приведённые к единице

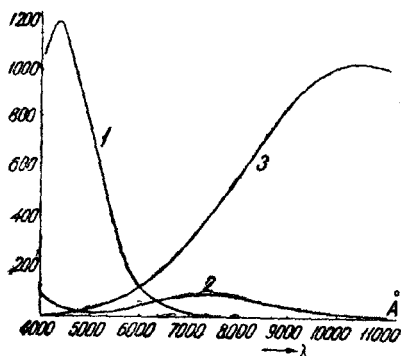


Рис. 3. Распределение чувствительности по спектру для Sb-Cs (1) и Cs-O-Ag (2) фотоэлементов в одном масштабе для фототока и (3) распределение энергии в спектре лампы накаливания

энергии, но не приведённые к одинаковой ординате в максимуме. Будучи сняты на одном и том же монохроматоре в одинаковых условиях, они имеют одинаковые шкалы по оси ординат и дают возможность видеть огромное различие в спектральных свойствах тех и других катодов, в частности различия в величине квантового выхода. Кривая 3 того же рисунка показывает распределение энергии в спектре лампы накаливания, непосредственно измеренное за выходной щелью монохроматора (т. е. без поправок на дисперсию). Эта группа кривых даёт возможность констатировать, что причины высокой чувствительности тех и других катодов совершенно различны. Для кислородно-серебряно-цезиевого катода высокая

чувствительность есть следствие большой протяжённости кривой по оси длин волн, в особенности в той области спектра, где энергия излучения велика. У сурьмяно-цезиевых катодов высокая чувствительность обусловлена исключительно высоким квантовым выходом в сравнительно узкой (и невыгодной в смысле количества энергии) области спектра. Это свойство катодов является одним из важнейших обстоятельств, открывающих новые возможности их использования, неосуществимые с фотоэлементами, имеющими кислородно-серебряно-цезиевые катоды, как это будет разъяснено далее.

В настоящее время, как можно видеть из предыдущего, ещё не существует количественной теории сурьмяно-цезиевого фотокатода. Первой попыткой в этом направлении является работа С. Ю. Лукьянова, доложенная им на Киевской конференции по катодным явлениям¹⁶, где он попытался применить метод Фаулера к случаю полупроводникового катода. Исходным пунктом является модель электронного (см. выше) полупроводника, содержащего примеси, данная Вильсоном²¹. Воспользовавшись обычными допущениями, а именно, что вероятность поглощения кванта частоты ν (в узком интервале частот) электроном с энергией ϵ есть величина постоянная и что коэффициент пропускания поверхности для электронов с энергией, большей энергии потенциального барьера, равен единице и равен нулю в обратном случае, а также используя для электронов внутри полупроводника максвелловскую статистику, Лукьянов приходит к следующей формуле для фототока i как функции частоты света ν и

температуры поверхности T :

$$i = a \sqrt[n_0]{T^{\frac{5}{4}}} e^{\frac{h\nu}{kT} - \frac{V}{2} + b}$$

или в виде, удобном для экспериментальной проверки,

$$\ln \frac{i}{T^{\frac{5}{4}}} = \ln a \sqrt[n_0]{T^{\frac{5}{4}}} + \frac{h\nu}{kT} - \frac{V}{2} + b,$$

где a — константа, n_0 — число атомов примеси в 1 см^3 , T — абсолютная температура поверхности, b — работа выхода и V — ширина запрещенной зоны между зоной занятых уровней и зоной проводимости.

Экспериментальная проверка показала применимость приведенной формулы в том случае, когда $\nu \approx \nu_0$, т. е. в области спектральной кривой, ближайшей к красной границе. При меньших длинах волны проявляются сильные расхождения. Это позволяет считать, что вблизи порога выхода фотоэффект сурьмяно-цезиевых катодов обусловлен электронами проводимости, механизм же эмиссии для области селективного максимума имеет иной и пока неясный характер. Несомненно, что это селективная эмиссия каких-то однородных эмиссионных центров, но судить о том, что это за центры, сейчас еще нет возможности.

III. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С СУРЬМЯНО-ЦЕЗИЕВЫМИ КАТОДАМИ

В этом разделе речь будет идти почти исключительно о вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементах, так как одним из важнейших результатов разработки сурьмяно-цезиевых фотокатодов явилась возможность замены (вследствие их высокой интегральной чувствительности) применявшихся до сих пор газонаполненных фотоэлементов вакуумными, что представляет весьма существенные преимущества.

1. Интегральная чувствительность. Чувствительность первых образцов фотоэлементов с Sb-Cs-катадами была невелика и составляла обычно от 10—15 до 30 $\mu\text{A/lm}$. Однако, весьма скоро в результате подбора условий обработки слоя сурьмы парами цезия удалось значительно повысить верхний предел чувствительности до 50—60 и даже 80 $\mu\text{A/lm}$. Дальнейшее увеличение чувствительности было осуществлено путем отчувствления катода кислородом при весьма малых давлениях ($\sim 10^4$ — 10^{-3} мм Hg), которое в свете цитированного выше исследования С. С. Прилежаева следует рассматривать как создание оптимального покрытия поверхности в результате окисления избытков свободного адсорбированного на поверхности цезия.

Чувствительность современных сурьмяно-цезиевых катодов даже в условиях серийного изготовления (лаборатория Московского электролампового завода) составляет 100 $\mu\text{A/lm}$, рекордные же образцы имеют чувствительность до 150—175 $\mu\text{A/lm}$. Это — значение чувствительности при температуре источника излучения в 2848° К и в условиях, исключаящих побочные факторы, могущие давать кажущееся увеличение чувствительности фотокатода.

2. Вольтамперные и световые характеристики. Фотоэлементы с сурьмяно-цезиевыми катодами существуют в виде двух основных типов, различающихся устройством катода. Эти два типа фотоэлементов ведут себя одинаковым образом в условиях малых освещенностей катода

и обнаруживают весьма существенные различия при больших освещенностях (порядка тысяч люксов и выше)

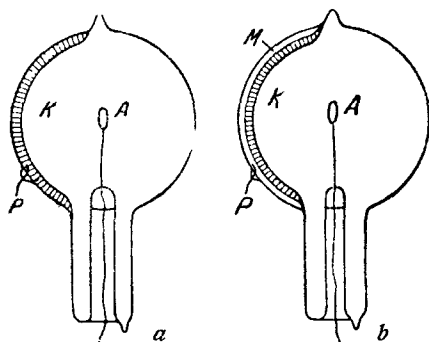


Рис. 4 Схема строения Sb-Cs-катодов:
а — катод без подкладки, б — катод на подкладке

На рис. 4, а изображено устройство катода первого типа (он является первым хронологически); рис. 4, б относится к второму типу. На обоих рисунках *K* обозначает сурьмяно-цезиевый слой, *P* — вывод катода (обычно платиновая проволока) и *A* — анод. Различие между обоими случаями состоит в наличии у катода второго типа под слоем *K* металлической подкладки *M*.

Как ясно из изложенного выше, продольное сопротивление катода, вследствие сравнительно высокого удельного сопротивления Sb-Cs-слоя и его малой толщины, может быть весьма значительным. В самом деле по данным разных авторов^{2,3}, сопротивление между двумя платиновыми вводами, расположенными на расстоянии 2—3 см друг от друга, может достигать $10^7 \Omega$. Это означает, что при достаточно больших освещенностях участков, удаленных от катодного вывода, вдоль слоя может устанавливаться значительное падение потенциала, вследствие чего могут являться два эффекта: во-первых, отсутствие насыщения при недостаточно высоких (для данного значения освещенности) анодных напряжениях и, во-вторых, — бомбардировка более дальних от вывода участков катода электронами, освобожденными с близких к нему участков. Первый эффект должен проявляться как увеличение потенциала насыщения фототока и уменьшения отдачи фотоэлемента при низких напряжениях на аноде, второй же — как отсутствие насыщения и при высоких анодных напряжениях вследствие возникновения вторичной эмиссии, растущей с увеличением скорости бомбардирующих электронов (как известно^{22,10} сурьмяно-цезиевые слои являются эффективными эмиттерами с коэффициентом вторичной эмиссии, достигающим иногда²³ 14, при скорости первичного пучка около 1 000 V).

Так как наличие металлического подслоя у катодов второго типа устраняет падение потенциала вдоль катода, то такие катоды должны быть свободны от указанных выше особенностей и в случае больших освещенностей.

Сказанное иллюстрируется рис. 5, а и 5, б, изображающими семейства вольтамперных характеристик обоих типов фотоэлементов при разных значениях освещенностей, причем рис. 5, а относится к фотоэлементу с катодом без подкладки. На этих рисунках цифры справа у кривых обозначают дробь — относительный масштаб по оси ординат (изменение его от одной

кривой к другой было необходимо для того, чтобы поместить все кривые на одном чертеже) и целое число — величину освещённости катода. Как видно, при малых освещённостях ход вольтамперных характеристик для обоих типов фотоэлементов одинаков, но, начиная с освещённости примерно в 1000 lx, фотоэлемент с катодом без подкладки обнаруживает те отклонения, о которых мы говорили выше. Для фотоэлементов второго типа также не наблюдалось некоторое возрастание потенциала насыщения, но оно невелико. Насыщение всё же, несомненно, существует. Наблюдающееся увеличение является следствием только увеличения объ-

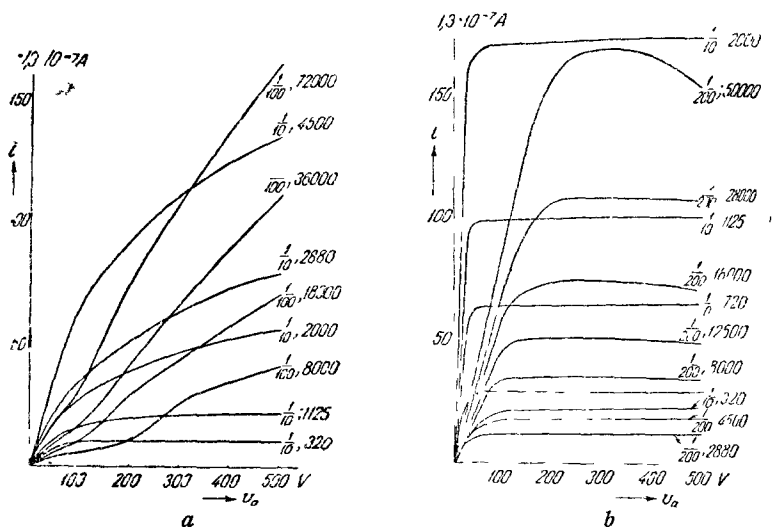


Рис. 5. Группа вольтамперных характеристик вакуумных Sb-Cs-фотоэлементов.

a — с катодом без подкладки, *b* — с катодом на подкладке

ёмных зарядов у поверхности катода. Заметное у некоторых кривых для фотоэлемента с катодом на подкладке уменьшение фототока с ростом анодного напряжения (кривые для больших освещённостей) не имеет ничего общего со свойствами вольтамперных характеристик как таковых и является следствием утомления катода, о котором мы будем говорить далее.

Некоторые авторы считали, что аномальный ход вольтамперных характеристик сурьмяно-цезиевых фотоэлементов является следствием высасывающего действия поля анода³ или поля зарядов, образующихся на поверхности катода²⁴. Эти представления, однако, полностью опровергаются более новыми опытами²⁵, в которых были соблюдены все необходимые меры предосторожности. Роль продольного сопротивления катода без подкладки может быть также продемонстрирована изменениями вольтамперных кривых под действием изменения температуры катода. На рис. 6 приведена группа таких кривых, из которой видно, что повышение температуры влечёт за собой улучшение насыщения.

Различия между катодами обоих типов проявляются также в ходе световых характеристик. При недостаточно высоких (по отношению к величине освещённости или светового потока) анодных напряжениях эти характеристики обнаруживают загиб к оси световых потоков (рис. 7 кривая 1). Наоборот, для фотоэлементов с катодами на подкладке световая характеристика является прямолинейной вплоть до самых больших применявшихся световых потоков (освещённости в 40 000—50 000 lx), при условии, что устранено утомление катода (рис. 7, кривая 2).

Масштаб по оси ординат на этом рисунке неодинаков для обеих кри-

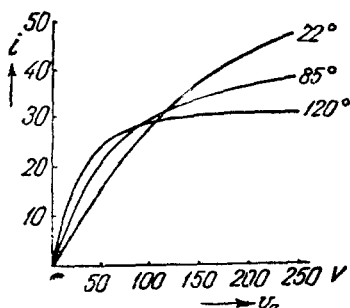


Рис. 6. Изменение хода вольтамперных кривых фотоэлемента без подкладки в зависимости от температуры (по оси координат отложен фототок в относительных единицах)

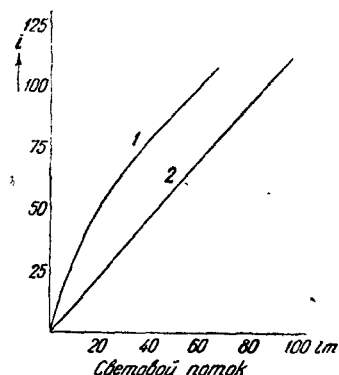


Рис. 7. Световые характеристики Sb-Cs-фотоэлементов: 1 — катод без подкладки, 2 — катод на подкладке

вых. Кривая 1 обнаруживает большую кривизну вначале, когда вторичная эмиссия мала вследствие недостаточно большого падения потенциала вдоль слоя, что обусловлено относительной малостью светового потока. Дальше кривизна уменьшается вследствие того, что все большую роль начинает играть добавка анодного тока за счёт вторичной эмиссии. Напомним, что фотоэлементы с катодами без подкладки могут при высоких анодных напряжениях (~ 1500 В) иметь (кажущуюся) чувствительность в 400—500 $\mu\text{A}/\text{lm}^2$ при истинной чувствительности катода в 50—60 $\mu\text{A}/\text{lm}^2$. Световые характеристики фотоэлементов без подкладки при потоках в доли люмена (примерно до 0,5 lm) неизменно обнаруживают строгую линейность.

Таким образом, различия между обоими типами фотоэлементов обуславливаются только значительным сопротивлением катода вдоль слоя и имеют, как принято говорить, не физический, а электротехнический характер. Эти различия существенны лишь при работе с большими световыми потоками, когда предпочтение должно быть отдано фотоэлементам с катодами на подкладке. В области малых освещённостей — к таковой относятся наиболее распространённые применения: звуковое кино, фото-телеграфия, обычная автоматика — с одинаковым успехом могут быть использованы фотоэлементы обоих типов. Различия между ними в отно-

шении спектральных свойств, утомления, величины интегральной чувствительности и т. д. не наблюдается.

Наиболее существенными особенностями, выгодно отличающими сурьмяно-цезиевые фотоэлементы от почти исключительно распространённых до настоящего времени кислородно-серебряно-цезиевых, являясь, с одной стороны, их высокая интегральная чувствительность и ход спектральной характеристики — свойства, о которых мы уже говорили выше, — с другой же, сравнительно весьма слабое утомление.

Говоря об утомлении сурьмяно-цезиевых катодов, необходимо различать два случая: утомление при малых освещённостях катода и утомление при больших освещённостях. Наибольший практический интерес представляет первый случай, поскольку в большинстве применений (звуковое кино, фототелеграфия и др.) приходится иметь дело с малыми световыми потоками — порядка сотых и даже тысячных долей люмена. При световых потоках обычных, например для звукового кино, утомление у вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементов проявляется чрезвычайно слабо²⁶. На рис. 8 приведена кривая утомления вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементов (кривая 1, верхний масштаб по оси времени), полученная как среднее для большого количества фотоэлементов и представляющая собой, таким образом, характеристику данного типа фотоэлементов.

Эта кривая замечательна тем, что она приближённо может быть разделена на две части: начальную, где обнаруживается относительно быстрое падение чувствительности со временем, и продолжение её, где уменьшение чувствительности идёт уже много медленнее. Аналогичный ход обнаруживают и кривые для фотоэлементов других типов. На том же рис. 8 кривая 2 изображает (также среднюю) кривую утомления для газонаполненного фотоэлемента с кислородно-серебряно-цезиевым катодом (фотоэлементы типа ЦГ-4) в тех же условиях освещения. Здесь также имеется быстро спадающая ветвь кривой, переходящая в почти горизонтальный участок. Таким образом, качественно ход утомления оказывается одинаковым, но в количественном отношении различие оказывается огромным. В самом деле, если для вакуумного Sb-Cs-фотоэлемента чувствительность уменьшается до $\sim 50\%$ за 4 000 час., то для кислородно-серебряно-цезиевого с газовым наполнением уже за 40 час. чувствительность падает до 30% начальной (масштаб времени для кривой 2 изображается цифрами нижней строки). Если принять для удобства количественного сравнения утомления различных фотоэлементов, что понижение чувствительности (начальная ветвь кривой) происходит по линейному закону (пунктирные линии на рис. 8), и принять за величину, характеризующую утомление фотоэлементов, «среднее утомление», определяемое как уменьшение чувствительности, выраженное в процентах от начальной за единицу времени (час).

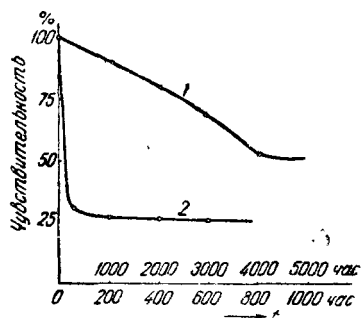


Рис. 8. Ход утомления на малых освещённостях (~ 20 люкс): 1 — для Sb-Cs-фотоэлемента (верхний масштаб оси времени); 2 — для Cs-O-Ag-фотоэлемента (нижний масштаб оси времени)

то из данных рис. 8 легко найти, что среднее утомление вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементов составляет около $0,0125\%$ /час, тогда как у газонаполненных кислородно-серебряно-цезиевых оно равно примерно $1,75\%$ /час. Иными словами, первые фотоэлементы утомляются в 140 раз медленнее.

Значение этого обстоятельства весьма велико как в том отношении, что оно означает большую экономию при замене кислородно-цезиевых газонаполненных фотоэлементов вакуумными сурьмяно-цезиевыми, так и потому, что во много раз увеличивает надёжность работы и срок службы фотоэлектрических устройств. Против такой замены иногда выдвигается

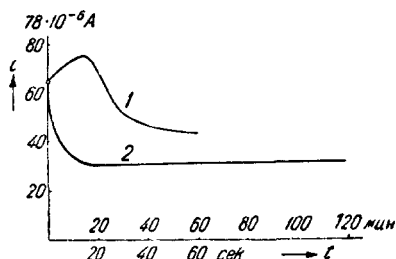


Рис. 9. Утомление Sb-Cs-фотоэлементов на больших освещенностях ($\sim 4 \cdot 10^4$ lx). Нижний масштаб оси времени — для кривой 1. По оси ординат отложен фототок при неизменном освещении

тогда как Sb-Cs-фотоэлемент сохраняет за это время свою начальную чувствительность полностью.

На рис. 8 можно видеть также, что чувствительность вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементов начинает падать не сразу после включения, но обнаруживает вначале некоторое возрастание. Такой ход изменения чувствительности характерен для подавляющего большинства фотоэлементов, приём наблюдается и при малых, и при больших освещенностях.

Утомление при больших световых потоках идёт в общем так же, как и на малых, но значительно быстрее. На рис. 9 показан ход утомления при освещенности катода около $4 \cdot 10^4$ lx (кривая 2). Здесь также видно начальное возрастание чувствительности (кривая 1, масштаб времени — по нижней шкале) и установление конечного значения чувствительности на уровне около 50% от начальной.

Характер процессов, обуславливающих явления утомления сурьмяно-цезиевых катодов, в настоящее время ещё совершенно не выяснен. Во всяком случае, следует думать, что он радикально отличается от того, который согласно де-Буру имеет место в сложных катодах обычного типа (например, кислородно-серебряно-цезиевый катод), где первичным процессом является возбуждение кристаллов вещества промежуточного слоя. Мы полагаем, на основе данных работ Прилежаева и тех изменений в форме спектральных характеристик, которые наступают в результате утомления²⁶, что первопричина утомления в данном случае состоит

тот аргумент, что чувствительность вакуумных Sb-Cs-фотоэлементов (которую в среднем можно считать равной от 90 до $110 \mu\text{A/lm}$) значительно ниже чувствительности газонаполненных кислородно-серебряно-цезиевых фотоэлементов ($150\text{—}200 \mu\text{A/lm}$). Поскольку, однако, здесь сравниваются лишь значения начальной чувствительности, ясно, что этот аргумент не выдерживает критики. В самом деле, из кривых рис. 8 можно видеть, что уже через 40 час. от высокой начальной чувствительности газонаполненного фотоэлемента остаётся лишь 30% , т. е. от 50 до $70 \mu\text{A/lm}$,

в необратимом удалении с поверхности катода в его толщу внешней адсорбированной плёнки цезиевых атомов, толщина которой определяет собой работу выхода поверхности.

IV. ПРИМЕНЕНИЯ СУРЬЯНО-ЦЕЗИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Основаниями для широкого применения сурьяно-цезиевых вакуумных фотоэлементов являются три обстоятельства:

1. Исключительно высокая средняя интегральная чувствительность Sb-Cs-катодов, втрое превышающая чувствительность обычных кислородно-серебряных катодов, считавшихся наиболее чувствительными до настоящего времени.

2. Исключительно слабое утомление.

3. Характер распределения чувствительности по спектру.

Здесь мы не останавливаемся на целом ряде преимуществ Sb-Cs-катодов в части технологии их изготовления, поскольку с точки зрения применений это вопрос второстепенный.

Выше мы уже показали, каким образом сочетание высокой чувствительности со слабым утомлением делает несомненным вытеснение газонаполненных фотоэлементов вакуумными. Сейчас мы остановимся на тех преимуществах, которые даёт спектральная характеристика сурьяно-цезиевого катода в целом ряде случаев.

Как видно из рис. 3, главными особенностями спектральной характеристики Sb-Cs-катода являются локализация чувствительности в сравнительно узкой области спектра и высокие значения квантового выхода. Малая протяжённость по спектру обуславливает высокую спектральную селективность этих катодов при высокой чувствительности за счёт большого квантового выхода. Это обстоятельство (наряду с высокой чувствительностью и постоянством) оказалось исключительно важным для использования новых фотоэлементов в фототелеграфии, так как они впервые позволили осуществить в двухцветном (чёрно-белом) воспроизведении передачу цветных объектов (текст, написанный цветными чернилами, подлинные документы, цветные рисунки, схемы, географические карты и т. д.). Как было сообщено инициатором введения сурьяно-цезиевых фотоэлементов в фототелеграфии А. М. Гурзвием в его докладе на уже упоминавшейся выше конференции в Кизве²⁷, неосуществимость правильной передачи цветных объектов с кислородно-серебряно-цезиевыми фотоэлементами обусловлена тем, что как белая, так и окрашенная бумага весьма сильно отражают в близкой инфракрасной области, где, во-первых, чувствительность катодов этого типа сравнительно велика и где, во-вторых, лежит максимум энергии в спектре излучения лампы накаливания (см. кривые 2 и 3 рис. 3). Это приводит к тому, что все окрашенные поля, за исключением чёрного и синего (карандаш), передаются как белые.

Внедрение вакуумных сурьяно-цезиевых фотоэлементов в звуковое кино, осуществляемое в настоящее время, обещает большую экономию средств, поскольку новые фотоэлементы могут работать без смены по крайней мере в 5—10 раз дольше применяемых сейчас газонаполненных. Принимая во внимание, что звуковое кино является наиболее массовым.

потребителем фотоэлементов (десяти тысяч штук в год), ясно, что появление сурьмяно-цезиевых катодов действительно представляет собой шаг вперёд, имеющий крупное народнохозяйственное значение. Однако, и здесь дело не исчерпывается этим. Как оказывается, намеченные перспективы развития кино требуют замены кислородно-серебряно-цезиевых фотоэлементов сурьмяно-цезиевыми по причине различий в спектральной чувствительности тех и других. Дело в том, что одной из важных задач, стоящих перед кинопромышленностью, является замена обычной целлулоидной плёнки (позитивной) с бромосеребряной эмульсией новыми сортами, более дешёвыми и безопасными в пожарном отношении. Такие

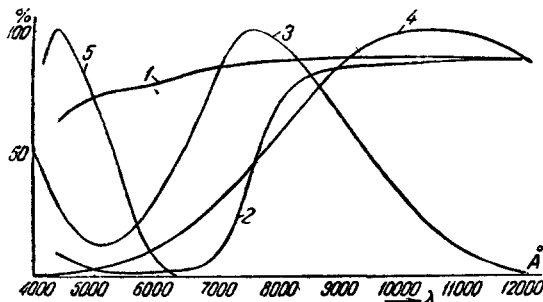


Рис. 10.

1 — Спектральное пропускание экспонированной вискозной плёнки; 2 — то же для экспонированной плёнки; 3 — спектральное распределение чувствительности Cs-O-Ag-фотоэлемента; 4 — распределение энергии в спектре лампы накаливания; 5 — спектральная чувствительность Sb-Cs-катада.

(По оси ординат все три величины нанесены в относительных единицах)

3 и 4). Это делает крайне затруднительным, если не вовсе невозможным, звуковоспроизведение с помощью кислородно-серебряно-цезиевых фотоэлементов. Н оборот, в случае сурьмяно-цезиевых фотоэлементов (рис. 10, кривая 5) тёмные места пленки оказываются непрозрачными²⁾.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо указанных выше применений, сурьмяно-цезиевые фотоэлементы с успехом используются в аппаратах «Говорящая бумага», в различных автоматических устройствах (где особенно ценным является постоянство их чувствительности). Сурьмяно-цезиевые катоды применяются также в киноскопах с переносом изображения²⁸, где они позволяют получать значительно большую чувствительность и осуществлять правильную цветопередачу с большим успехом, чем это удаётся, например, с прозрачными

¹⁾ Эти исследования были произведены НИКФИ совместно со Светотехнической лабораторией НИИС НКС я и.

²⁾ На рис. 10, в отличие от рис. 3, кривые спектральной чувствительности, как обычно, приведены к одной ординате в максимум.

плёнки были разработаны НИКФИ. При исследовании¹⁾ их спектрального пропускания оказалось, однако, что места почернения этих плёнок обладают очень большой прозрачностью в области от 6000—7000 Å и далее в сторону длинных волн (см. рис. 10, кривая 1—2), т. е. опять в той области спектра, где велика чувствительность кислородно-серебряно-цезиевого катада и где применяемый источник света (лампа накаливания) даёт максимум энергии (рис. 10, кривые

и серебрино-цезиевыми катодами, которые и по сей день применяются в Америке.

Производство сурьмяно-цезиевых фотоэлементов освоено на заводском уровне, который в настоящее время выпускает конструктивных типа таких фотоэлементов под марками СЦВ-1 (предназначен для фототелеграфии и кинопередвижек) и СЦВ-2 (для кинематографических установок звукового кино).

Добавление при корректуре

С того времени, когда эта статья была сдана в печать, прошло несколько лет, в течение которых работа по сурьмяно-цезиевым фотоэлементам значительно сократилась по причинам объективного характера. Тем не менее, в этой области были достигнуты определенные успехи.

Одно из существенных новых данных о Sb-Cs-катадах было получено в результате исследования спектральной чувствительности их в ультрафиолетовой области, произведенное сначала автором и впоследствии совместно в сотрудничестве с А. Е. Мелашидом. Эти исследования показали, что Sb-Cs-катод обладает высокой чувствительностью к излучению в области длин волн по крайней мере в 2500 Å и весьма слабым утомлением действием также и ультрафиолетового излучения. Это дало возможность сконструировать весьма простые чувствительные и стабильные фотоэлектрические индикаторы ультрафиолетового излучения для указанного диапазона длин волн.

Вторым важным результатом этой работы явилось произведенное автором подробное исследование утомления Sb-Cs-фотоэлементов на больших световых потоках, приведшее к созданию практически неутомляющихся фотоэлементов для световых потоков порядка десятков люменов.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Görlich, Z. Physik, 101, 335, 1936; см. также Н. С. Зайцев, Успехи физич. наук, 19, 278, 1938.
2. Н. Н. Лущева, Журнал технич. физики, 7, 1900, 1937.
3. Н. С. Хлебников и Н. С. Зайцев, Журнал технич. физики, 9, 44, 1939.
4. См., например, Я. Г. Дорфман и И. К. Кикоин, Физика металлов, ГТТИ, 1933.
5. См., например, N. R. Campbell, Phil. Mag., 12, 174, 1931.
6. Н. С. Зайцев, Журнал технич. физики, 9, 661, 1939.
7. См., например, доклад С. Ю. Лукьянова на Киевской конференции по катодным явлениям, 1940 г., Физич. записки АН УССР, 9, 1941.
8. С. Ю. Лукьянов и И. С. Мазовер, Журнал технич. физики, 9, 1459, 1939.
9. См. Материалы совещания по фотоэффекту и вторичной эмиссии при Ленинградском индустриальном институте, 20—22 января 1939 г.
10. Н. Д. Моргулис и Б. И. Дятловская, Журнал технич. физики, 10, 637, 1940.
11. Н. Г. Борзяк, Доклад на Киевской конференции по катодным явлениям, 1940 г., Физич. записки АН УССР, 9, 173, 1941.
12. См. рис. 14.
13. С. С. Прилежаев, Журнал технич. физики, 9, 1441, 1939.
14. Я. Г. де-Бур, Электронная эмиссия и явления диссоциации, ОНТИ, 1938.

- ...ер, Г. Симон и Р. Зурман, Фотоэлементы и их приложения, ...
...ер, С. Ю. Лукьянов, Материалы Киевской конференции 1940 г.,
...и АН УССР, 9, 168, 1941.
...Хлебников и Н. С. Зайцев, Успехи физич. наук, 19, 275,
...Лукьянов, Журнал технич. физики, 9, 1175, 1939.
...Гуревич, Журнал технич. физики, 10, 943, 1940.
...Птилежаев, Материалы Киевской конференции 1940 г., Физич.
...АН УССР, 9, 163, 1941.
...он, Proc. Roy. Soc., 133, 459, 1931; 134, 277, 1932.
...Хлебников, Журнал технич. физики, 9, 367, 1939.
...Хлебников, Материалы Киевской конференции 1940 г., Физич. записки
...ССР, 9, 163, 1941.
...Тимофеев и Ю. И. Лунькова, Журнал технич. физики, 10, 20,
...Хлебников, Журнал технич. физики, 10, 1908, 1940.
...Хлебников и П. А. Сеницын, Журнал технич. физики, 10, 1913,
...Гуревич, Материалы Киевской конференции 1940 г., Физич. записки
...ССР, 9, 223, 1941.
...например, Успехи физич. наук, 24, 294, 1940.
-