

О СВЯЗИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ФОТОКАТОДА С НАДЕЖНОСТЬЮ ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Х.Н. ВЕЗИРОВ

*Институт Фотоэлектроники АН Азербайджана
Баку, 370141, ул. Ф.Агаева, 555 квартал*

Разработан метод определения сопротивления фотокатода и переходной области, который позволяет прогнозировать долговечность вакуумных фотоэлектронных приборов.

Повышение надежности вакуумных фотоэлектронных приборов является очень актуальной проблемой. Поэтому исследование процессов, приводящих к деградации (потере эффективности фотоэмиссии) фотокатода и связанное с этим определение его электрического сопротивления представляет большой интерес. Однако используемые методы определения сопротивления проводящих пленок на диэлектрических подложках, например, с помощью емкостного датчика, входящего в колебательный контур генератора [1] или связанные с измерением токов и напряжений [2] неточны, а самое главное, не дают возможность определять переходное сопротивление между контактной пленкой (манжетой [3]) и фотокатодом вдоль линии (границе) их соприкосновения.

Исследования же показывают, что определение именно этого переходного сопротивления представляет большой интерес.

родную сплошную пленку (как считалось раньше), периферийная часть которой лежит на манжете, а внутренняя часть - непосредственно на подложке, образуя рабочую область фотокатода. Установлено, что вдоль линии внутренней границы манжеты (т. е. по границе рабочей области фотокатода) эта пленка фотокатода имеет разрывы и трещины. В результате этого (т.е. разрывов) электрическое сопротивление пленки фотокатода в месте соединения с манжетой должно отличаться от сопротивления пленки фотокатода в его рабочей области. При протекании тока через фотокатод, т.е. при работе фотоэлектронного прибора, в случае, если сопротивление перехода намного превышает сопротивление пленки фотокатода в его рабочей области, практически все напряжение, образующееся между центральными областями фотокатода и электрическим выводом прибора падает именно на участке между манжетой и краем рабочей области фотокатода (т.е. на разрыве). Это приводит к возникновению внутри разрыва электрического поля, направленного от фотокатода к манжете (рис. 1).

При рабочих значениях протекающего тока (порядка нескольких микроампер) и сопротивлению перехода порядка нескольких МОм, напряжение U между границей рабочей области фотокатода и манжетой составит несколько десятков Вольт. Непосредственные измерения ширины разрывов пленки фотокатода микроскопом дают значение порядка 0,1 мкм. Поэтому напряженность электрического поля E внутри разрыва может превосходить 10^8 В/м. Известно, что работа выхода пленки Ag-O-Cs фотокатода меньше 1 эВ [4], и так как, при таких больших значениях E снижение работы выхода под действием электрического поля (определяемое соотношением $\Delta e\phi = 3,79 \cdot 10^4 \cdot E^{1/2}$) по абсолютной величине может превосходить даже собственную работу выхода $e\phi$, то внутри разрыва будет возникать значительная автоэлектронная эмиссия. Электроны, эмитированные в область разрыва внутренним краем манжеты, ускоряются электрическим полем внутри разрыва и со средней энергией U эВ (т.е. несколько десятков эВ) бомбардируют границу рабочей области фотокатода. А так как энергия диссоциации практически всех молекул, из которых состоит Ag-O-Cs фотокатод, меньше 5 эВ, при работе фотоэлектронного прибора на границе рабочей области фотокатода за счет электронной бомбардировки происходит диссоциация хотя бы некоторых ингредиентов фотокатода. Так, окислы цезия типа Cs_xO_y , где $x \leq y$ (например, Cs_2O_2) могут восстанавливаться до основного окисла цезия, и даже, до недоокисей типа $Cs_{11}O_3$. Окислы же серебра могут восстанавливаться до элементарного серебра. При

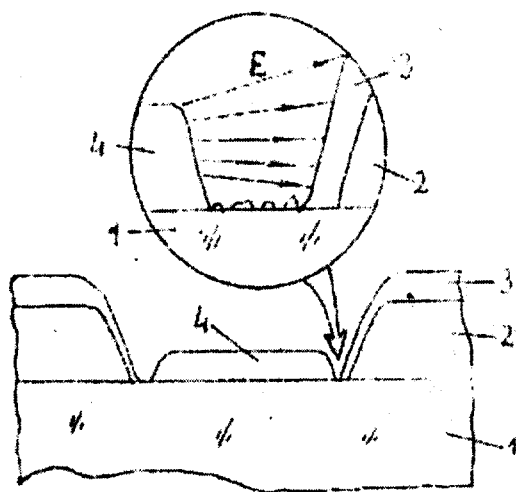


Рис. 1. Возникновение электрического поля внутри разрыва в пленке

Дело в том, что в серийно выпускаемых фотоэлектронных приборах, например, с Ag-O-Cs фотокатодом, толщина манжеты в несколько раз превышает толщину фотокатода (более 120 нм и порядка 30 нм) и коэффициенты линейного расширения материалов манжеты, фотокатода и подложки сильно различаются. Технология же изготовления фотокатода включает многократные нагревы до 200°C и охлаждения до комнатной температуры. В результате этого, как показали исследования, окончательно изготовленный фотокатод не представляет одно-

этом высвобождающийся кислород может выделяться в газовую фазу и взаимодействуя с поверхностью фотокатода, нарушать его оптимальную структуру и состав, приводя к увеличению работы выхода и потере чувствительности.

Действительно, в экспериментах замечено, что в тех фотоэлектронных приборах с Ag-O-Cs-фотокатодом, в которых начальное переходное сопротивление имело величину нескольких МОм и превышало сопротивление пленки фотокатода в рабочей области, после значительной потери чувствительности на границе рабочей области фотокатода, хотя бы в некоторых местах, образуется визуально заметное изменение цвета, пропорциональное степени деградации (т.е. ширина участков изменения цвета пропорциональна степени деградации и может достигать долей миллиметра, а сам цвет пленки фотокатода в этих местах - желтоватый, напоминает напыленную на стекло пленку неокисленного серебра). То есть, изменение цвета произошло из-за высвобождения кислорода - превращения окислов серебра и цезия до состояния недокисей или даже металлов.

Таким образом, к известным механизмам деградации фотокатодов, таким как ионная бомбардировка фотокатода, натекание газов через микротрещины в объем прибора, газовыделение с внутренних поверхностей прибора, его арматуры, люминофора, фотохимическое разложение фотокатода и др., следует прибавить еще один, связанный с электронной бомбардировкой границы рабочей области фотокатода, приводящей к диссоциации его ингредиентов и высвобождению атомов в объем прибора.

Однако, отсутствие, методов измерения этого переходного сопротивления приводит к необходимости разработки такого метода.

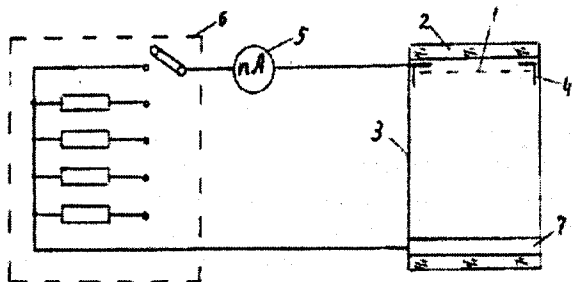


Рис.2. Схема, объясняющая суть метода

На рис.2 приведена суть метода. Фотокатод 1 нанесен на подложку 2 фотоэлектронного прибора 3 таким образом, что периферийная часть фотокатода, лежит на манжете 4 (обычная конструкция вакуумных фотоэлектронных приборов). Манжету через измеритель тока 5 соединяют последовательно через магазин сопротивлений 6 с анодом 7 фотоэлектронного прибора. Фотокатод облучают потоком света из области его чувствительности. Луч света при этом представляет в поперечном сечении кольцо. Этот свет направляют на область фотокатода, прилегающую к манжете, но при этом этот свет манжеты не касается. Свет вызывает с фотокатода электронную эмиссию. Этот фототок измеряют при нулевом сопротивлении магазина 6. Затем постепенно увеличивая сопротивление магазина добиваются заметного уменьше-

ния фототока. Измеряют этот фототок. После этого тот же поток света фокусируют в точке в центре фотокатода и измеряют фототок при нулевом сопротивлении магазина и добиваются заметного уменьшения фототока повышением сопротивления магазина. Этот ток также измеряется. Электрическое сопротивление перехода и фотокатода определяют из соотношений:

$$r = R \cdot J / (J_0 - J) \quad (1)$$

$$\rho / h = \pi [(r - R_1) i - r i_0] / (i_0 - i) \quad (2)$$

где r -электрическое сопротивление перехода, Ом; ρ/h -поверхностное электрическое сопротивление пленки фотокатода, Ом/кв.см; J_0, J -фототоки от потока света в виде кольца, соответственно, при нулевом сопротивлении магазина и при сопротивлении магазина, равном R_1 ; R -сопротивление магазина, при котором фототок от света в виде кольца упал от J_0 до значения J , Ом; i_0, i -фототоки от сфокусированного в центр луча света, соответственно, при нулевом сопротивлении магазина, и при сопротивлении магазина, равном R ; R_1 -сопротивление магазина, при котором фототок от сфокусированного в центр фотокатода луча света упал от i_0 до i , Ом.

Идея метода заключается в том, что облучение не всей площади фотокатода, а только именно области фотокатода, прилегающей к манжете, потоком в виде узкого кольца, не касающегося манжеты, позволяет исключить фототок со всей пленки фотокатода, т.е. дает возможность определить сопротивление именно перехода манжеты в фотокатод. Подключение же к цепи анод-фотокатод последовательно магазина сопротивлений и гальванометра позволяет изменять общее сопротивление цепи и по изменению тока (связанного с изменением общего сопротивления цепи) сравнивать сопротивление перехода манжета-фотокатод с сопротивлением магазина.

Световой поток, представляющий собой в поперечнике кольцо, легко получить пропуская сплошной поток через непрозрачную диафрагму с кольцевым вырезом. Магазин сопротивлений должен содержать сопротивления от нуля до 10^9 Ом. Измерителем тока может служить наноамперметр.

Следует особо подчеркнуть, что схема на рис. 2 не содержит отдельного источника тока. Дело в том, что при облучении фотокатода светом, вызывающим фотоэмиссию, эмиттированные фотоэлектроны сами без "посторонней помощи" летят до анода, создавая тем самым в цепи электрический ток (хотя и малый, но вполне достаточный для измерения). При облучении прилегающей к манжете области фотокатода лучом света в форме кольца возникает фотоэлектронная эмиссия (фотоэлектроны летят на анод, создавая в цепи фототок). Измерив фототок при нулевом сопротивлении магазина, постепенно увеличивают сопротивление магазина, следя за фототоком (свет при этом продолжает падать в виде кольца на прилегающую область фотокатода). При заметном (т.е. достоятельном) изменении (уменьшении) фототока (например, на 3%), это значение сопротивления магазина и ток записывают и из соотношения (1) находят величину переходного сопротивления манжета-фотокатод.

Например, первоначальный фототок (при нулевом сопротивлении магазина) был равен $J_0=90 \cdot 10^{-9}$ А. Фототок упал до значения, скажем, $J=86 \cdot 10^{-9}$ А (т.е. вполне заметно) при сопротивлении магазина равном $R=100$ кОм. Следовательно, искомое сопротивление перехода равно $r=10^5 \cdot 86 \cdot 10^{-9} / (90-86) \cdot 10^{-9} = 2,15$ МОм.

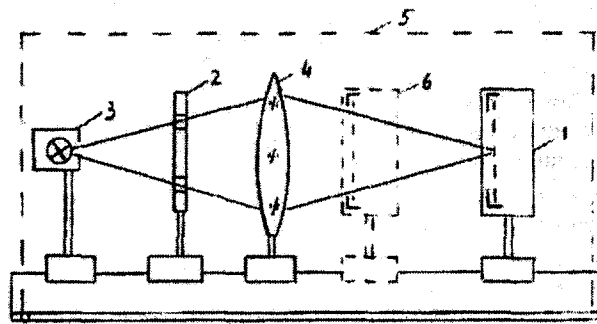


Рис.3. Измерительная установка

Затем определяется сопротивление самой пленки фотокатода. Для этого луч света фокусируют в точку, и направляют в центр фотокатода. Этого можно добиться изменением расстояния от фотоэлектронного прибора до диафрагмы (рис.3).

Снова определяют ток при нулевом сопротивлении магазина и увеличивая сопротивление последнего, добиваются заметного уменьшения фототока (луч света непрерывно падает в центр фотокатода), после чего из соотношения (2) определяют сопротивление пленки фотокатода. Например, первоначальное значение фототока при облучении центра фотокатода было равно $i_0=70 \cdot 10^{-9}$ А. При сопротивлении магазина, равном $R_1=2 \cdot 10^5$ Ом произошло падение фототока до $i=65 \cdot 10^{-9}$ А. Учитывая, что сопротивление перехода равно $r = 2,15$ МОм (см. предыдущий пример), из соотношения (2) найдем сопротивление пленки фотокатода:

$$\rho/h = \pi [(2,15 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^5) \cdot 65 \cdot 10^9 - 2,15 \cdot 10^6 \cdot 70 \cdot 10^9] / (70-65) \cdot 10^9 = 1,41 \text{ МОм/кв.см.}$$

И первый, и второй пример взяты из непосредственных измерений фотоэлектронного прибора типа М-9 [2] с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом. Интересно, что сопротивление самой пленки меньше сопротивления перехода.

Соотношения для расчетов сопротивления получены из следующих соображений. При облучении фотокатода излучением, вызывающим с него фотоэмиссию, между точкой падения излучения и внешним электродом манжеты возникает разность потенциалов, т.к. на месте электронов, покидающих вследствие фотоэмиссии фотокатод остается нехватка зарядов. Собственно пополнение фотокатода электронами (т.е. электрический ток) происходит из-за этой разности потенциалов. Сопротивление току оказывают элементы фотоэлектронного прибора, по которым течет ток, т.е. внешний электрод манжеты, сама манжета, переход манжеты в фотокатод и сам фотокатод. Сопротивлением внешнего электрода манжеты и самой манжеты можно пренебречь, т.к. у них очень хорошая проводимость (внешний электрод обычно изготавливается из платиновой проволоки, а манжета - из достаточно толстой металлической пленки, в результате чего их суммарное сопротивление составляет доли Ома). Таким образом, сопротивление электрическому току оказывает переход манжеты в фотокатод и сам фотокатод. Для исключения сопротивления фотокатода, облучение фотокатода осуществляют не по всей его площади, а лишь в области, прилегающей к манжете, т.е. в виде узкого (тонкого) кольца. При этом вся остальная часть (область) фотокатода остается необлученной. Таким образом, фотоэмиссия происходит лишь с приманжетной области и можно считать, что фототоку оказывает сопротивление лишь переход манжета-фотокатод. Тогда можно написать $U=J_0 r$. Если теперь на пути тока поставить еще и дополнительное сопротивление R (магазин сопротивлений) то, естественно, ток должен уменьшиться и принять значе-

ние J . Тогда $U=J(r+R)$. Приравнивая эти два уравнения, получим: $J_0 r = J r + J R$ или $r(J_0 - J) = J R$. Отсюда для сопротивления перехода можно получить соотношение (1). Теперь, после того, как найдено сопротивление перехода, можно найти сопротивление самого фотокатода. Для этого свет необходимо сфокусировать в точку в центре фотокатода и измерить фототок i_0 , когда сопротивление магазина равно нулю. После этого установить сопротивление магазина таким, чтобы фототок упал до значения i . Тогда можно написать

$$(r+R_{пл}) i_0 = u' ; (r+R_{пл} + R_1) i = u'$$

Отсюда

$$(r+R_{пл}) i_0 = (r+R_{пл} + R_1) i$$

где $R_{пл}$ -сопротивление пленки фотокатода от его центра до перехода манжета-фотокатод. Из последнего уравнения можно получить: $r i_0 + R_{пл} i_0 = r i + R_{пл} i + R_1 i$; отсюда

$$R_{пл} = [i (r+R_1) - r i_0] / (i_0 - i) \quad (3)$$

Это значение сопротивления пленки фотокатода, измеренное между центром фотокатода и манжетой не несет большой информационной ценности. Поэтому переведем это сопротивление в поверхностное сопротивление, которое принято измерять в Ом/кв.см [2]. Для этого сперва напишем уравнение сопротивления проводника с удельным сопротивлением ρ , длиной l и сечением S : $R=\rho l/S$. Для случая круглого фотокатода толщиной h можно считать, что общее сопротивление пленки, измеренное между ее центром и внешней окружностью, равно общему сопротивлению параллельно включенных секторов с углом $d\alpha$, когда число секторов стремится к бесконечности, а угол $d\alpha$ при этом стремится к нулю. Тогда

сопротивление одного такого элементарного сектора (рис.4) будет:

$$dR = \rho l / dS = \rho l / (h \cdot x / 2), \text{ где } x = l \cdot \sin(\alpha).$$

Так как для малых углов синус угла равен самому углу, то $x = l \cdot \alpha$. Тогда $dS = h l d\alpha / 2$, а сопротивление элементарного сектора будет равно $dR = 2\rho / (h d\alpha)$.

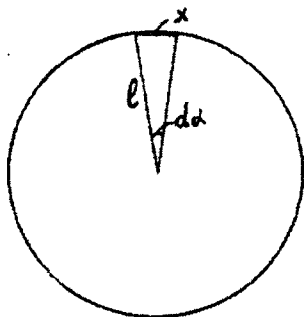


Рис.4. К вычислению сопротивления круглой пленки

Для параллельного соединения сопротивлений общее сопротивление определяется уравнением:

$$1 / R_{\text{общ}} = \sum_{n=1}^{\infty} (1 / dR_n).$$

Таким образом, для расчета нам необходимы обратные сопротивления: $1/dR = (h d\alpha) / 2\rho$. Проинтегрировав это выражение по всем углам, найдем:

$$1 / R_{\text{общ}} = \int_0^{2\pi} \left(\frac{h}{2\rho} \right) d\alpha = \left(\frac{h}{2\rho} \right) \cdot \int_0^{2\pi} d\alpha = \pi h / \rho$$

Вновь взяв обратную величину, найдем $R_{\text{общ}} = \rho / \pi h$, т.е. $\rho / h = \pi R_{\text{общ}}$. Таким образом, для нахождения поверх-

ностного сопротивления необходимо полученное из измерений сопротивление (3) умножить на π .

Разработанный метод позволяет также прогнозировать явно недолговечные приборы. Это такие приборы, в которых, во-первых, сопротивление перехода в несколько раз (5 и более раз) превышает сопротивление пленки фотокатода в его рабочей области. Это условие необходимо для того, чтобы напряжение, возникающее вследствие протекания фототока, падало в основном на переходе (разрыве фотокатода). Второе условие определяется из соотношения $D < JR$, где D - максимальная энергия диссоциации для молекул фотокатода, эВ; J - величина фототока, А; R - сопротивление перехода, Ом. Так, для Ag-O-Cs фотокатода D меньше 5 эВ. Если ток через фотокатод будет в данном приборе иметь величину 2 мкА, то сопротивление R , необходимое для того, чтобы работал указанный механизм деградации составит $5В / 2 \cdot 10^{-6} А = R$, т.е. R должно быть больше $2,5 \cdot 10^6$ Ом. Если же ток будет 10 мкА, то R для такого тока должен быть $5 \cdot 10^5$ Ом. Другими словами, если имеется прибор, в котором переходное сопротивление равно, скажем, 5 МОм и оно, скажем, в 10 раз превышает сопротивление фотокатода, то значение тока через фотокатод, при котором будет происходить диссоциация молекул фотокатода, и, стало быть, долговечность прибора будет низкой, будет равно $J = 5В / 5 \cdot 10^6 Ом = 1 \cdot 10^{-6} А = 1 \text{ мкА}$. Т.е., при токах больших 1 мкА в этом приборе кроме других механизмов деградации будет наблюдаться также и деградация фотокатода, связанная с диссоциацией его молекул в разрыве, вызванная электронной бомбардировкой. Таким образом, при токах больших 1 мкА долговечность этого прибора будет низкой.

Разработанный метод успешно используется в производстве электронно-оптических преобразователей для отбора явно недолговечных изделий.

[1] Авт. свид. СССР № 467300, 1975.
 [2] М.М. Бутслов, Б.М. Степанов, С.Д. Фанченко. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М., Наука, 1978, с. 478.

[3] В. Гартманн, Ф. Бернгард. Фотоэлектронные умножители. М.-Л., Госэнеэргоиздат, 1961, с.48.
 [4] В.С. Фоменко. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев, Наукова думка, 1981, с.223.

Н. Н. Vəzirov

KATODUN MÜQAVİMƏTİ İLƏ VAKUUM FOTOELEKTRON CİHAZININ E'TİBARLILIĞI ARASINDA ƏLAQƏ HAQQINDA

Fotokatodun və keçid sahəsinin müqavimətinin təyin edilməsinin ələ metodu işlənmişdir ki, vakuum fotoelektron cihazlarının e'tibarlılığını proqnozlaşdırmağa imkan verir.

Kh.N. Vezirov

ON THE CONNECTION BETWEEN PHOTOCATHODE RESISTANCE AND RELIABILITY OF A VACUUM PHOTOELECTRON DEVICE

The method for determination of the resistance of photocathode and transition region is suggested, which allows forecast reliability of vacuum photoelectron devices.

Дата поступления: 08.01.01

Редактор: А.М. Гашимов