

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-240

P13-95-240

И.Е.Чириков-Зорин, О.Е.Пухов

О СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

1995

1. Введение

В последние годы в методике проволочных детекторов интенсивно развивается направление, связанное с разработкой и исследованием возможностей дрейфовых камер, изготавливаемых на основе тонкостенных трубок из лавсана или другого материала. В литературе за такими детекторами установился термин "straw tubes". Они имеют значительные преимущества по сравнению со стандартными конструкциями камер, в которых анодные проволочки помещаются в общий газовый объем. "Straw tubes" представляют собой набор цилиндрических газоразрядных счетчиков, катоды которых обычно изготавливают из лавсановых пленок с односторонним токопроводящим покрытием. В настоящее время эти детекторы получают широкое распространение и их применение предусматривается в большинстве новых проектов экспериментов по физике элементарных частиц.

В данной работе приведены результаты наблюдения и анализа новых свойств газоразрядных счетчиков с катодом из алюминизированной лавсановой пленки^{1/}.

2. Счетные и шумовые характеристики счетчиков

Цилиндрические счетчики имели диаметр 10 мм и изготавливались методом формования^{1/} из алюминизированной лавсановой пленки толщиной 100 мкм. Толщина полупрозрачного токопроводящего слоя составляла $\sim 0,07$ мкм. В качестве анодов применялись проволочки из бериллиевой бронзы диаметром 50 и 100 мкм. Для наполнения счетчиков использовались газовые смеси при разных давлениях на основе аргона с добавками неорганических многоатомных газов. Исследования проводились с помощью радиоактивного источника Ru^{106} с интенсивностью $\sim 10^6$ распад/с. Сигналы с анодной проволочки усиливались токовым усилителем с входным сопротивлением ~ 80 Ом и собственным временем нарастания ~ 4 нс. Порог усилителя-дискриминатора составлял ~ 2 мкА.

При исследовании счетных и шумовых характеристик счетчиков были замечены некоторые особенности их поведения, трудно поддающиеся объяснению. На рис. 1 приведены шумовые характеристики счетчика на плато, измеренные при разных условиях. Кривая 1 получена в процессе измерения счетной характеристики, для этого на

время измерения интенсивности шума прекращалось облучение счетчика радиоактивным источником. Кривая 2 получена после измерения счетной характеристики. При этом интенсивность шума в конце плато ($U=3,05$ кВ) сразу после прекращения облучения счетчика была нестабильна и падала со временем до некоторого постоянного значения, слабо убывающего с уменьшением напряжения. Если подвергать счетчик повторному кратковременному облучению, то интенсивность шумов восстанавливается до значений кривой 1 в соответствии с приложенным напряжением, а затем медленно падает до величин кривой 2, имевших место до облучения. Такое поведение шумовых характеристик наблюдалось с различными газовыми наполнениями и при разных давлениях.

Время падения скорости счета шумовых послеразрядных импульсов составляло минуты и не может быть объяснено образованием возбужденных метастабильных атомов, так как время их жизни значительно меньше.

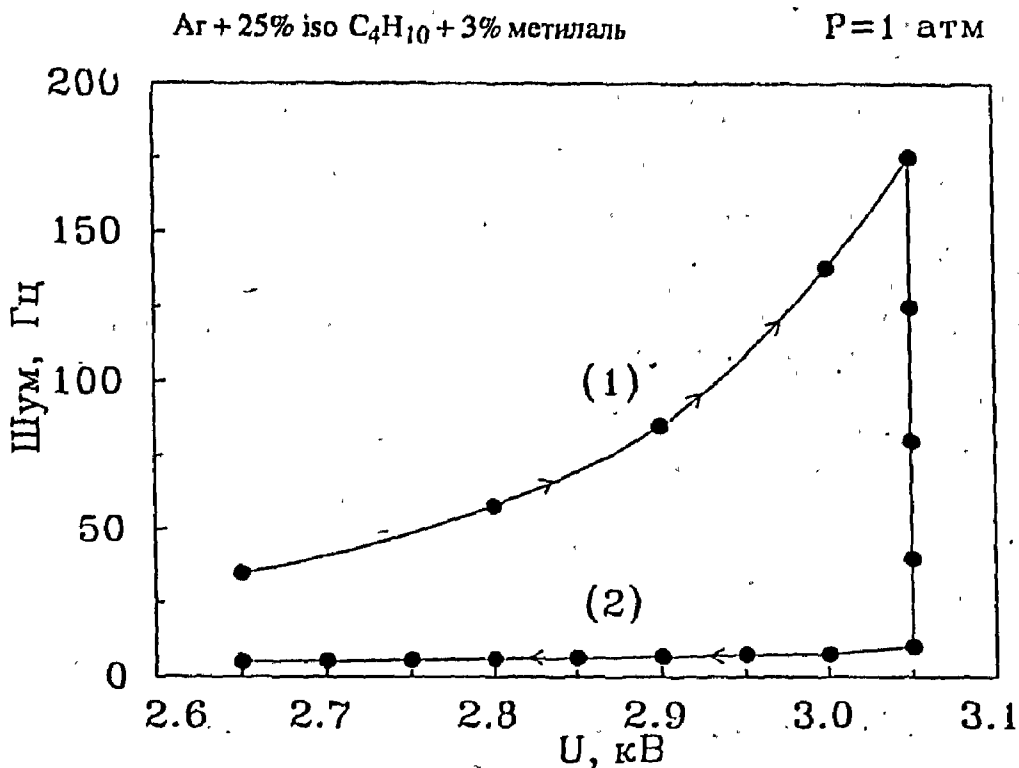
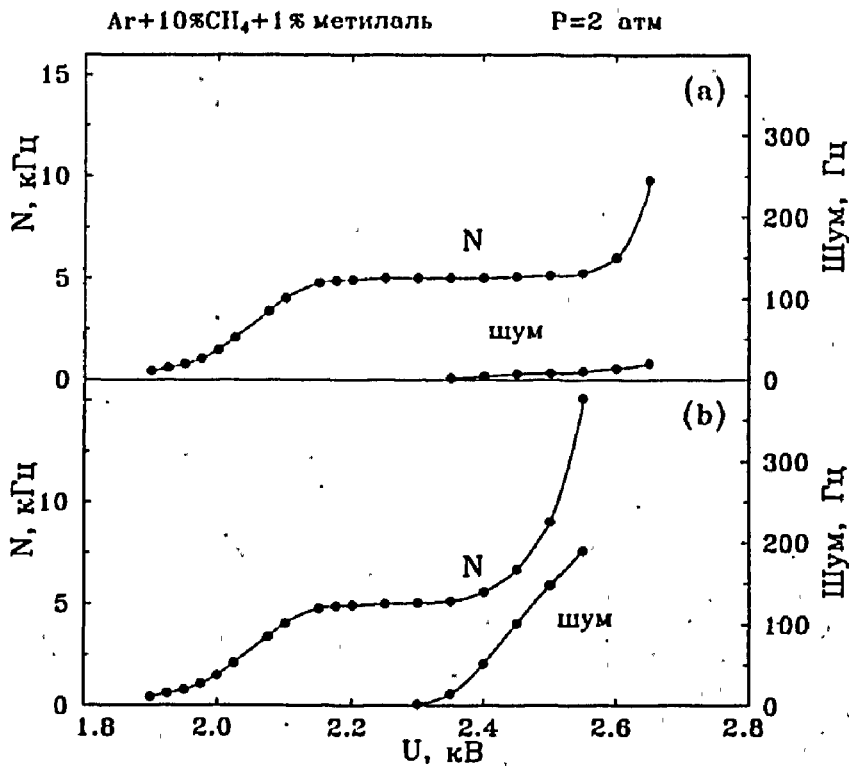
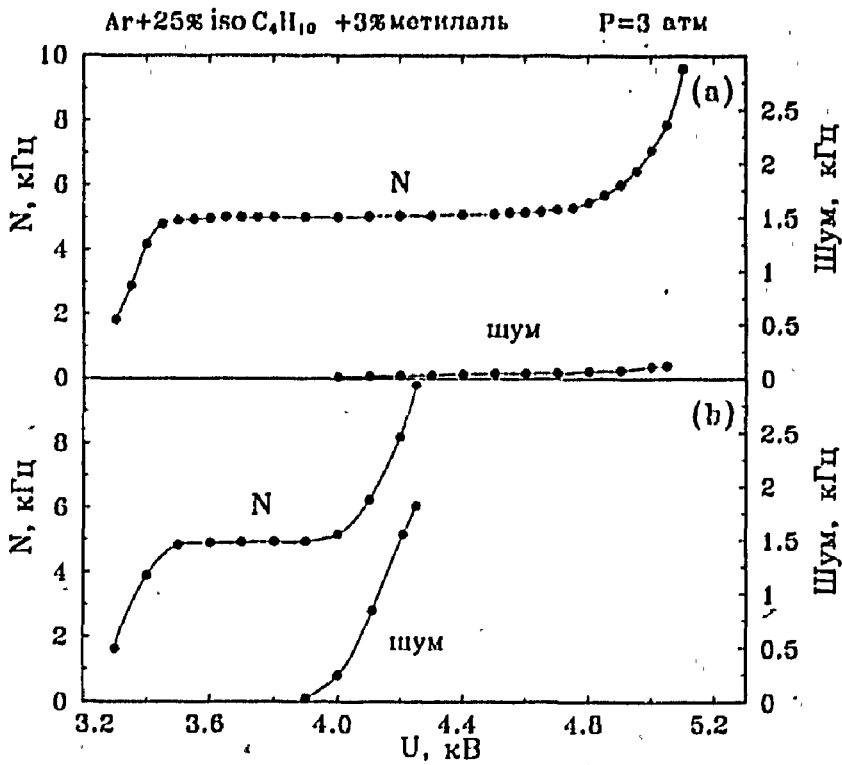


Рис. 1. Зависимость интенсивности шума от напряжения питания счетчика. Диаметр анодной проволоки 100 мкм. Стрелками показано изменение напряжения питания

Рис. 2. Зависимость скорости счета (N) и интенсивности шума от напряжения питания счетчика. Диаметр анодной проволоки 50 мкм. (а) – счетчик светоизолирован; (б) – счетчик без светоизоляции



Впоследствии, при детальном исследовании свойств счетчика, было замечено, что интенсивность шумов, а также длина плато счетной характеристики коррелируют с уровнем естественного освещения. Для иллюстрации данного эффекта на рис. 2 приведены счетные и шумовые характеристики освещенного и затемненного счетчиков с разными газовыми наполнениями. Как видно из рисунка, наблюдается значительное увеличение протяженности плато счетной характеристики у светополированного счетчика. Следовательно, обрыв плато затемненного счетчика происходит вследствие увеличения скорости счета под воздействием видимого света.

Возвращаясь к рис. 1, прежде всего отметим, что наблюдаемое поведение шумовой характеристики обусловлено чувствительностью счетчика к естественному освещению, которая возникает под действием ионизирующего излучения и падает со временем после прекращения облучения. Из рисунков 1,2 также следует, что светочувствительность повышается при увеличении коэффициента газового усиления и интенсивности внешнего ионизирующего излучения (в наших опытах: 1) радиоактивный источник Ru^{106} ; 2) естественный фон космического излучения). Все это указывает на то, что светочувствительность зависит от количества электрического заряда, образующегося при работе счетчика.

Впоследствии мы наблюдали сигналы при освещении счетчика обычной лампой накаливания. При этом скорость счета возрастала в $10^4 \div 10^5$ раз, была стабильной и зависела от уровня освещенности. По видимому при значительной интенсивности газовых разрядов, вызванных световым потоком от лампы, светочувствительность счетчика стабилизируется без применения внешнего интенсивного источника ионизирующего излучения.

Таким образом, было обнаружено новое свойство пропорционального счетчика с катодом из лавсановой пленки с полупрозрачным алюминиевым слоем — чувствительность к видимому свету.

Необходимо отметить, что энергии квантов видимого света ($h\nu < 3,1$ эВ) недостаточно для фотоэлектронной эмиссии из алюминиевого катода (работа выхода Al составляет 4,25 эВ), а также для фотоионизации газового наполнения счетчика (потенциал ионизации более 10 эВ).

3. Временной спектр от импульсного источника света

С целью выяснения механизма светочувствительности были измерены временные спектры сигналов со счетчика от импульсного источника видимого света. Схема установки для проведения этих исследований показана на рис. 3. Возможности данной установки по пространственной локализации, а также исследованию инерционности процесса

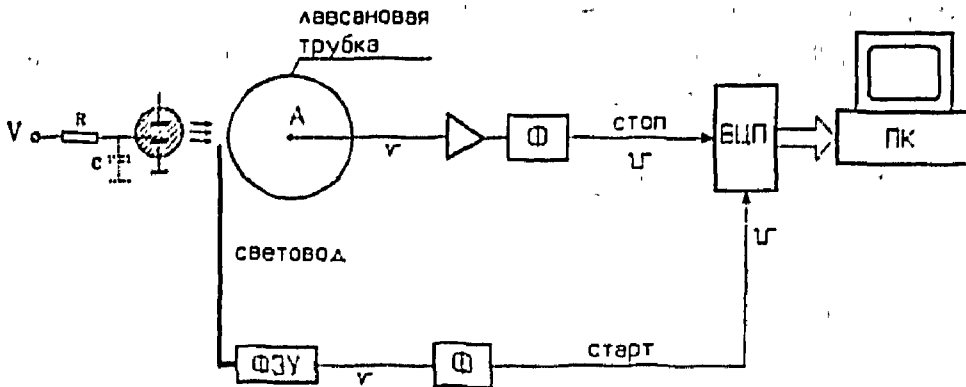


Рис. 3. Блок-схема установки для измерения временных спектров

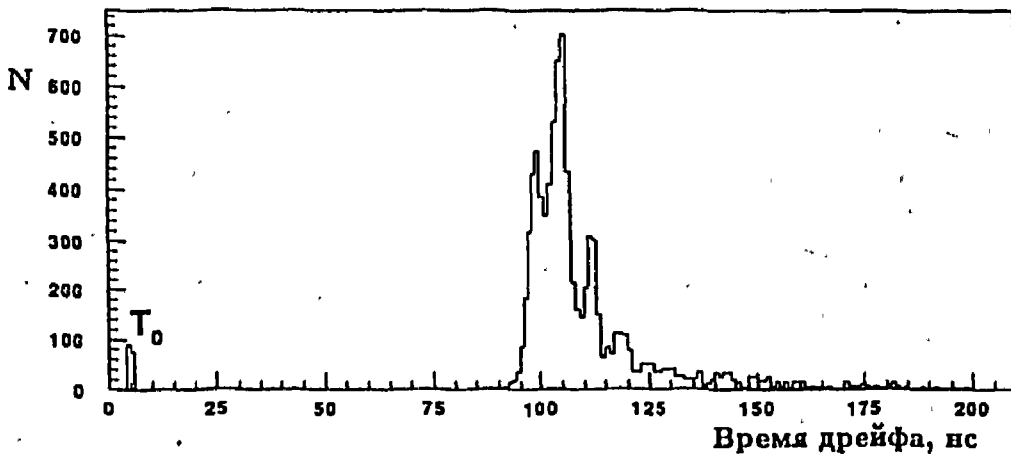


Рис. 4. Временной спектр сигналов со счетчика от импульсного источника света

образования электронов в рабочем объеме счетчика в первую очередь определяются временными характеристиками источника света.

В качестве импульсного источника света была использована газоразрядная лампа, включенная в схему релаксационного генератора (рис. 3). В этой схеме периодически осуществляется зарядка конденсатора C от источника высокого напряжения V через сопротивление R до потенциала зажигания газового разряда, после чего лампа вспыхивает и конденсатор начинает разряжаться. Когда конденсатор разряжается до потенциала гашения, лампа гаснет и цикл повторяется вновь. Для достижения минимального фронта и длительности световой вспышки газовый разряд в лампе зажигался между поджигающим электродом и катодом, а в качестве конденсатора использовалась емкость монтажа схемы.

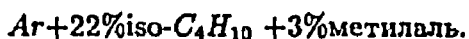
Таким образом были достигнуты следующие параметры импульсного источника света: длительность фронта световой вспышки ~ 10 нс, ширина на полувысоте и спад ~ 15 нс. Частота повторения импульсов составляла ~ 2 кГц. Форма светового сигнала и частота следования были определены с помощью фотоумножителя.

Важно отметить, что при работе релаксационного генератора в момент зажигания газового разряда излучается электромагнитный импульс, который наводит сигнал в анодной проволочке счетчика, работающей как приемная антенна, и может быть зарегистрирован при недостаточной экранировке излучателя и приемника.

В дальнейшем этот сигнал использовался для определения временного pedestala канала регистрации (T_0), пренебрегая временем распространения радиоволны до анодной проволочки.

Временные измерения проводились при освещении участка катода счетчика диаметром ~ 2 мм. Стартовый сигнал вырабатывался с помощью фотоумножителя (ФЭУ), на который оптическим волокном подавалась часть света от вспышки. Сигнал с анодной проволочки (А) счетчика поступал на обычный канал регистрации, состоящий из усилителя, формирователя (Ф), и использовался в качестве "стоп" для время-цифрового преобразователя (ВЦП). Информация с ВЦП считывалась с помощью персонального компьютера (ПК).

Для наполнения счетчика при данных исследованиях использовалась смесь



На рис. 4 показано временное распределение сигналов от импульсного источника света. В начале временной шкалы имеется небольшой пик, полученный от радиосигнала, излученного релаксационным генератором, положение которого (T_0) соответствует временной задержке сигналов с временем дрейфа электронов, равным нулю. Форма временного спектра сигналов от импульсного источника света согласуется с параметрами световой вспышки, определенными при помощи фотоумножителя, а фронт распределения соответствует положению катода согласно скорости дрейфа электронов в данной газовой смеси. Это означает, что светочувствительность газоразрядного счетчика обусловлена фотоэффектом на катоде из алюминизированной лавсановой пленки.

Интересно отметить, что временное распределение имеет осцилляции, обусловленные колебательным характером переходного процесса разряда конденсатора релаксационного генератора.

Действительно, так как в качестве конденсатора использовалась емкость монтажа, то наличие индуктивности проводников, соединяющих конденсатор и электроды газоразрядной лампы, приводит к колебательному характеру процесса разряда. Период осцилляций интенсивности света во временном спектре согласуется с расчетом, основанным на

оценке емкости и индуктивности монтажа схемы релаксационного генератора.

В заключение подчеркнем, чувствительность счетчика к видимому свету обусловлена фотоэффектом на катоде из алюминизированной лавсановой пленки, причем энергии квантов видимого света недостаточно для фотоэлектронной эмиссии из алюминия.

4. Механизм светочувствительности счетчика

В результате проведенных исследований установлены следующие особенности эффекта светочувствительности газоразрядного счетчика с катодом из алюминизированной лавсановой пленки.

1. Установлено, что чувствительность счетчика к видимому свету возникает под воздействием ионизирующего излучения и наблюдалась с различными газовыми наполнениями и при разных давлениях.
2. Показано, что светочувствительность растет при увеличении силы газоразрядного тока, т.е. количества электрического заряда, образующегося при работе счетчика.
3. Наблюдается падение с течением времени светочувствительности счетчика после значительного уменьшения интенсивности внешнего ионизирующего излучения.
4. Убедительно установлено, что светочувствительность в видимой области спектра обусловлена фотоэффектом на тонкослойном полупрозрачном катоде из алюминия, красная граница которого находится в ультрафиолетовой области. Это указывает на то, что работа выхода алюминизированного катода счетчика уменьшается в результате протекания газоразрядного тока.

Анализируя вышеизложенные закономерности, рассмотрим механизм эффекта, основанный на понижении работы выхода электронов алюминиевого катода электрическим полем по Шоттки. Схема, поясняющая механизм явления, приведена на рис. 5.

Алюминиевый катод счетчика покрыт плотной тончайшей естественной пленкой диэлектрика Al_2O_3 , которая очень прочно держится на металле и надежно защищает его от дальнейшего окисления. В условиях сухого воздуха и комнатной температуры естественная оксидная пленка достигает конечной толщины $0,003 \text{ мкм}^2$.

Положительные ионы, возникающие у анодной проволоочки (А) в газовом разряде, дрейфуют к катоду и осаждаются на поверхности диэлектрической оксидной пленки. Образованный положительный поверхностный заряд (σ) создаст в диэлектрическом слое электрическое поле (E_σ), тянущее электроны к поверхности металлической подложки.

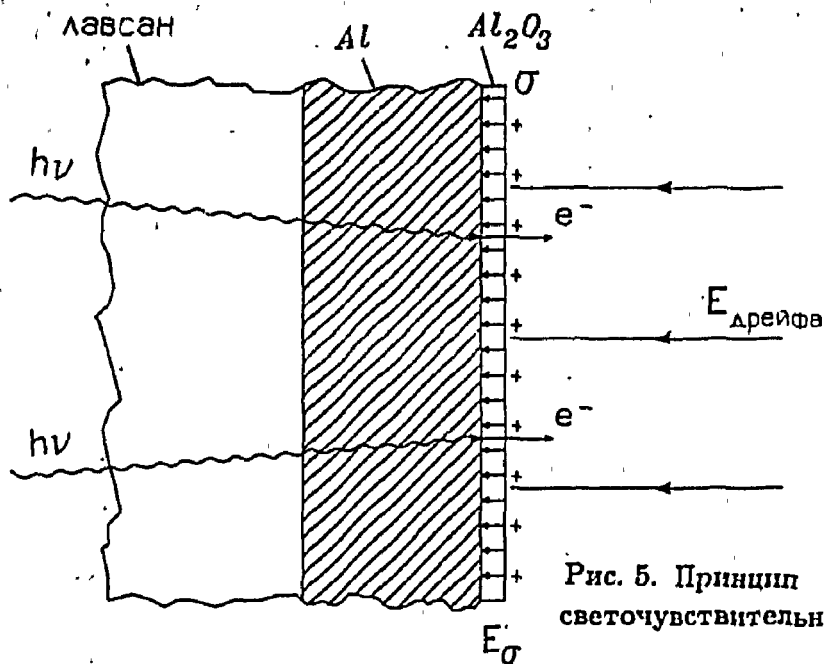


Рис. 5. Принцип светочувствительности счетчика

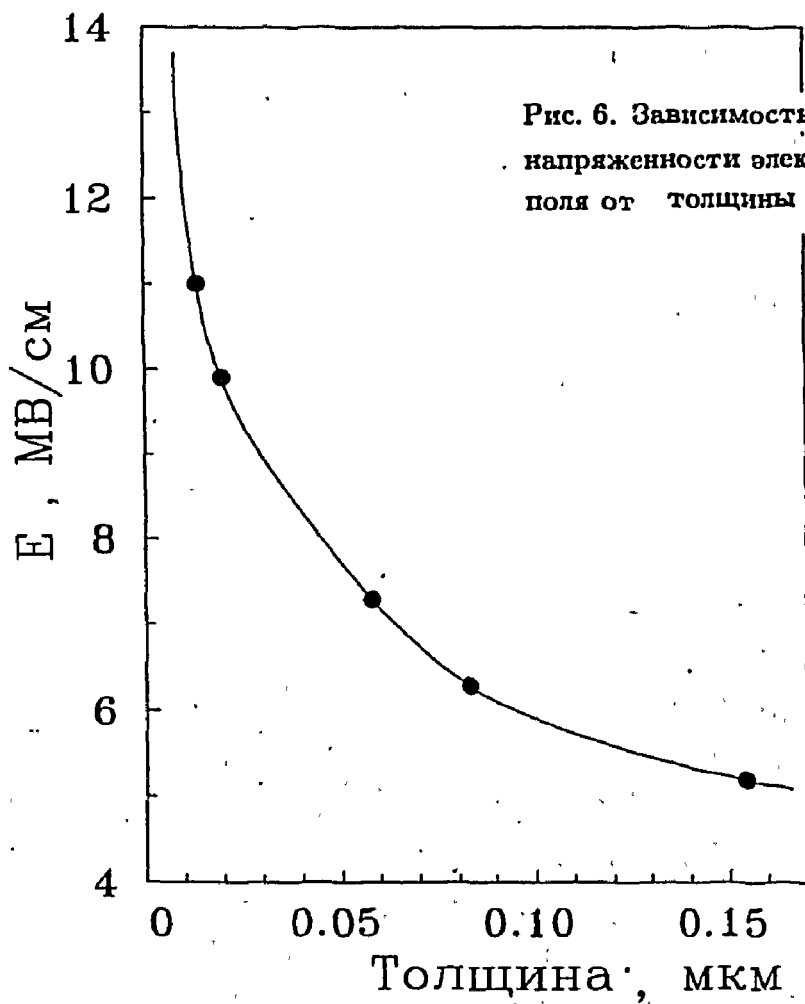


Рис. 6. Зависимость пробивной напряженности электрического поля от толщины Al_2O_3

В этом случае работа выхода электронов из катода определяется законом Шоттки:

$$\chi = \chi_0 - e\sqrt{eE_\sigma},$$

где χ_0 — работа выхода алюминия при внешнем электрическом поле, равном нулю, e — заряд электрона.

Внешнее электрическое поле понижает потенциальный барьер на границе металл-диэлектрик на величину

$$\Delta\varphi = \sqrt{eE_\sigma} = 3,79 \cdot 10^{-4} \sqrt{E_\sigma},$$

где $\Delta\varphi$ в вольтах, а E_σ в В/см.

Определим напряженность электрического поля, необходимую для сдвига красной границы фотоэффекта из ультрафиолетовой области в видимую. Для этого нужно уменьшить работу выхода алюминия на величину

$$\Delta\chi = \chi_0 - h\nu = 1,2 \text{ эВ} \quad \text{или} \quad \Delta\varphi = 1,2 \text{ В},$$

где $h\nu$ — энергия кванта света в фиолетовой области спектра ($\lambda=400$ нм), равная $\sim 3,1$ эВ. Отсюда находим, что $E_\sigma = 7 \cdot 10^6 (\Delta\varphi)^2 = 10^7$ В/см. Следовательно, для существования фотоэффекта в видимой области спектра на алюминиевом катоде необходимо, чтобы диэлектрическая пленка Al_2O_3 выдерживала без электрического пробоя напряженность поля $\sim 10^7$ В/см.

Как известно, пробивная напряженность для различных твердых диэлектриков одного и того же порядка и составляет $\sim 10^6$ В/см. Но наблюдается резкий рост пробивной напряженности поля при малых толщинах диэлектрических слоев $\leq 0,1$ мкм^[3]. Зависимость электрической прочности от толщины оксида алюминия, построенная по данным работы^[4], приведена на рис. 6. Из зависимости следует, что естественная пленка Al_2O_3 толщиной $\sim 0,003$ мкм может выдерживать напряженности электрического поля $\sim 10^7$ В/см. Таким образом обеспечивается стационарное существование "сверхпробивных" напряженностей полей в тонком слое диэлектрика в области, близкой к алюминиевой подложке. Важно подчеркнуть, что при этих условиях, как следует из рис. 2(а), не наблюдается интенсивная молтеровская эмиссия электронов из катода^[5], наличие которой привело бы к значительному наклону счетной характеристики и высокой интенсивности шумовых импульсов. Известно, что молтеровская эмиссия развивается лишь при толщинах диэлектрической пленки, превышающих некоторую минимальную величину^[6]. По-видимому толщина естественной оксидной пленки на алюминии недостаточна для возникновения молтеровской эмиссии.

Оценим время зарядки поверхностного слоя, необходимое для создания электрического поля $E_\sigma = 10^7$ В/см и, следовательно, возникновения светочувствительности счетчика. Рассматривая поле поверхностного

заряда как поле бесконечно заряженной плоскости, найдем плотность поверхностного заряда из соотношения

$$\sigma = E_0 \epsilon_0 \epsilon = 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2,$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ — диэлектрическая проницаемость Al_2O_3 , равная 10. Отсюда легко оценить, что время формирования поверхностного заряда составляет несколько секунд при коэффициенте газового усиления $\sim 10^6$ и интенсивности радиоактивного источника $\sim 10^6$ част/с.

Оксид алюминия является очень хорошим диэлектриком, поэтому естественно возникает вопрос, каким образом нейтрализуются положительные ионы, поступающие на катод из газового разряда. Очевидно, что при достаточно большом накопленном заряде может произойти пробой пленки Al_2O_3 , приводящий к нейтрализации поверхностного заряда. Но пробой пленки не происходит благодаря эффекту Пуля¹⁷⁾, суть которого заключается в экспоненциальном увеличении электропроводности диэлектриков от напряженности электрического поля в предпробивном состоянии. Эффект Пуля ограничивает накопление поверхностных зарядов и стабилизирует напряженность электрического поля в диэлектрическом слое. Таким образом обеспечивается стационарный характер эффекта светочувствительности газоразрядного счетчика.

Важно отметить, что под действием внешнего электрического поля изменяется не только работа выхода, но также увеличивается и квантовая эффективность фотокатода:

$$Q = K(h\nu - h\nu_0 + e\sqrt{eE_0})^2.$$

Здесь K — константа, характеризующая материал фотокатода, ν_0 — граничная частота фотоэффекта при внешнем электрическом поле, равном нулю, ν — частота регистрируемого света. Например, вблизи красной границы при $h(\nu - \nu_0) = 1$ эВ квантовая эффективность фотокатода из алюминия составляет $\sim 0,5\%$, а при $E_0 = 10^7$ В/см увеличивается почти в 5 раз и составляет $\sim 2,4\%$.

5. Заключение

В заключение обратим внимание на влияние эффекта светочувствительности катода на некоторые особенности работы газоразрядных детекторов, а также на возможное использование его в практике.

Обычно в качестве материала для катодов газоразрядных детекторов используется бериллиевая бронза, алюминий и медь. Все эти материалы имеют на поверхности диэлектрические оксидные пленки. Поэтому в процессе работы детектора понижается работа выхода катода, приводящая к увеличению темнового тока, интенсивности шумов,

уменьшению протяженности плато счетной характеристики. Эти эффекты давно наблюдались, а С. Корф еще в 1946 году рекомендовал предохранять внутреннюю поверхность счетчиков от попадания на нее световых лучей^{/8/}. Сейчас ясно, что для подавления вышеперечисленных эффектов необходимо при изготовлении катодов детекторов использовать материалы, не имеющие оксидных пленок, или материалы, которые образуют рыхлые пленки, не обладающие хорошими диэлектрическими свойствами, например медь.

Известно, что газоразрядные счетчики с катодами, изготовленными из алюминия или магния, недостаточно надежны из-за склонности к возникновению послеразрядов^{/9/}. По-видимому причина этого заключается в образовании оптической обратной связи анод-катод в видимой области спектра. Действительно, ультрафиолетовое излучение, возникающее в газовом разряде, обычно поглощается многоатомными молекулами, имеющимися в газовой смеси, и не вызывает фотоэффекта на катоде. Но видимое излучение плохо поглощается газами и поэтому может образовать фотоэлектроны на катоде, когда работа выхода его понижена. Таким образом возникает следующий разряд и т.д.

Отметим также возможное влияние оксидной пленки на процесс старения алюминиевых дрейфовых трубок, популярных в настоящее время. В работе^{/10/} показано, что старение трубок приводит к увеличению связи коэффициента газового усиления с интенсивностью внешнего облучения.

Известно, что в газовом разряде образуются полимерные соединения, которые осаждаются на оксидной пленке катода и значительно увеличивают толщину диэлектрического слоя при большом флюенсе. Для нейтрализации положительных ионов газа, поступающих на катод, необходимо создать сильное электрическое поле в диэлектрическом слое, которое увеличит его электропроводность по эффекту Пуля. При значительной толщине образовавшегося диэлектрического слоя (\sim мкм) нужно накопить достаточно большой поверхностный заряд, чтобы создать в диэлектрике сильное электрическое поле. Таким образом это приведет к снижению напряженности поля у анодной нити и уменьшению коэффициента газового усиления, который будет зависеть от силы газоразрядного тока и, соответственно, от интенсивности внешнего облучения.

Обнаруженный эффект светочувствительности катода может оказаться полезным для практических целей. Например, для создания координатных фотодетекторов большой площади для RICH-счетчиков. Современное состояние технологии позволяет напылять тонкие слои металла и диэлектрика. Поэтому сильное электрическое поле у металлической подложки может быть создано не только поверхностным зарядом ионов газа, но и приложением напряжения на пленочную систему металл-диэлектрик-металл.

Эффект может быть использован при создании установок, подобных изображенной на рис. 3, для контроля параметров газовых смесей (дрейфовой скорости, коэффициента диффузии, наличия электроотрицательных примесей и др.) систем проволочных детекторов.

Применение импульсных источников света в видимой области спектра для получения фотоэлектронов на катодах газоразрядных детекторов будет полезным при исследовании их свойств, особенно в сильных магнитных полях.

Литература

1. Yu. Budagov, I. Chirikov-Zorin, L. Golovanov, et al., - Nucl. Instr. and Meth., A330 (1993) 458.
2. Алюминиевые сплавы. Под ред. Х. Нильсен, В. Хуфнагель, Г. Ганулис, - пер. с нем. М., "Металлургия", 1979.
3. S. Whitehead, - Dielectric breakdown of solids, Oxford, 1951.
4. Lomer F.D., - Nature, 166 (1950) 191.
5. L. Malter, - Phys. Rev., 49 (1936) 879.
6. М.И. Элинсон, Д.В. Зернов, - Радиотехника и электроника, 1 (1957) 75.
7. H. Poole, - Phil. Mag., 32 (1916) 112.
8. С. Корф, - Счетчик электронов и ядерных частиц. Пер. с англ. М., "Иностранная литература", 1947.
9. Э. Фюнфер, Г. Нейерт, - Счетчики излучений. Пер. с нем. М., 1961.
10. A. Algeri et al., - CERN-PRE/93-76, 22 Apr. 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 июня 1995 года.