Journal of Surface Physics and Engineering, 2018, vol. 3, No. 3, pp. 106-113

УДК 621.393.3:621.382:621.385

ПЕРЕХОДНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕРХТОНКОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

З. Хайдаров[1], Х. Т. Йулдашев[1]

[1]*Ферганский политехнический институт, ул. Ферганская, 86, 150107 Фергана, Узбекистан*

E-mail: hurshid5704@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2018

В настоящей работе исследованы переходные фотоэлектрические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке. Рассмотрены вопросы задержки пробоя газового разряда в импульсном режиме работы ячейки и электростатические явления переходных процессов. Установлено, что время задержки пробоя зависит от интенсивности освещения полупроводника, длительности и величины импульса напряжения, а также состояния поверхностного заряда, то есть напряженности поля поверхностных зарядов.

Ключевые слова: газоразрядная ячейка, фотоприемник, задержка пробоя, поверхностный заряд, ваттамперная характеристика, кинетика импульсного тока, интенсивность свечения разряда.

ПЕРЕХІДНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПРОЦЕСИ В НАДТОНКІЙ ГАЗОРОЗРЯДНІЙ КОМІРЦІ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

З. Хайдаров[1], Х. Т. Йулдашев[1]

[1]*Ферганський політехнічний інститут, вул. Ферганська, 86, 150107 Фергана, Узбекистан*

У роботі досліджені перехідні фотоелектричні процеси в надтонкій газорозрядній комірці. Розглянуто питання затримки пробою газового розряду в імпульсному режимі роботи комірки та електростатичні явища перехідних процесів. Встановлено, що час затримки пробою залежить від інтенсивності освітлення напівпровідника, тривалості та величини імпульсу напруги, а також стану поверхневого заряду, тобто напруженості поля поверхневих зарядів.

Ключові слова: газорозрядна комірка, фотоприймач, затримка пробою, поверхневий заряд, ваттамперная характеристика, кінетика імпульсного струму, інтенсивність світіння розряду.

TRANSITION PHOTOELECTRIC PROCESSES IN A SUPERFLUID GAS-DISCHARGE CELL WITH SEMICONDUCTOR ELECTRODES

Zokirjon Khaydarov[1], Xurshid Yuldashev[1]

[1]*Fergana Polytechnic Institute, 86 Fergana Str., 150107 Fergana, Uzbekistan*

In this paper, transient photoelectric processes in a hyperfine gas-discharge cell were investigated. The issues of delay of the gas discharge breakdown in the pulsed mode of the cell operation and the electrostatic phenomena of the transient processes are considered. It is established that the breakdown delay time depends on the semiconductor illumination intensity, the duration and magnitude of the voltage pulse, and also the state of the surface charge, that is, the field strength of the surface charges.

Keywords: gas-discharge cell, photo detector, breakdown delay, surface charge, watt ampere characteristic, kinetics of pulse current, intensity of glow discharge

ORCID IDs

Zokirjon Khaydarov: https://orcid.org/0000-0002-1542-9323

Xurshid Yuldashev: https://orcid.org/0000-0003-0244-4230

ВВЕДЕНИЕ

Сверхтонкая газоразрядная ячейка (20 – 100 мкм), состоящая из фоточувствительного полупроводникового электрода и расположенного через газоразрядный промежуток волоконно-оптической шайбы с проводящим прозрачным покрытием из SnO_2, является основным элементов полупроводниковой фотографической ионизационной камеры (ПФИК) [1 – 4]. Кинетика тока в такой ячей-

© З. Хайдаров, Х. Т. Йулдашев, 2018

ке и кинетика свечения разряда отчасти уже исследованы в работе [5]. Установлено, что статистический разброс задержки пробоя при пренебрежимо малом сопротивлении электродов соответствует функции распределения экспоненциального типа, тогда как разброс при достаточно большой величине сопротивления полупроводникового электрода описывается функцией, близкой функции случайных ошибок [6].

Действительно, полупроводниковый электрод является самым высокоомным элементом электрической цепи сверхтонкой газоразрядной ячейки и поэтому им будет определяться величина проходящего стационарного тока ПФИК, которая равна фототоку в полупроводнике [7].

В случае переходных процессов, например, при подключении внешнего напряжения или при «мгновенном» изменении проводимости полупроводника, величина поверхностного заряда может оказаться в полном несоответствии с током проводимости, что вызывает явления электростатического характера. Существенную роль в токопрохождении играет поверхностный электрический заряд, локализирующийся на границе раздела полупроводник – плазма газового разряда, самосогласованный по величине с плотностью тока и во многом определяющий стационарную вольт-амперную характеристику ПФИК.

Однако, до сих пор переходные фотоэлектрические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке достаточно не изучены. Данные о влиянии послепробойного статистического разброса и времени задержки пробоя, а также величины поверхностного заряда на фотоэлектрические характеристики сверхтонкой газоразрядной ячейки в научных публикациях отсутствуют.

Целью настоящей работы является выявить закономерности переходных процессов, происходящих в сверхтонкой газоразрядной ячейке ПФИК с учетом задержки пробоя газового разряда и распределения поверхностного заряда на полупроводниковом фотоприемнике.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования газоразрядной ячейки с толщиной 40 мкм и 100 мкм при давлении воздуха 0,2 атм с электродами из компенсированного хромом арсенида галлия при комнатной температуре с темновым удельным сопротивлением ~10^8 Ом·см и кремния, легированного платиной при T = 80 K с темновым удельным сопротивлением ~10^9 Ом·см в условиях весьма малых сквозных токов или их отсутствия, когда эффекты электростатического характера проявляются наиболее отчетливо.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения экспериментальных работ была использована ПФИК. Принципиальная электрическая схема сверхтонкой газоразрядной ячейки показана на рис. 1. Между фотоприемником и волоконно-оптической шайбой подключался основной источник питания постоянного тока U_1, кроме того к источнику постоянного тока последовательно или прямо к газоразрядной ячейке может быть подключен высоковольтный тиратронный импульсный генератор U_2 с длительностью импульсов t_V = 0,5 – 30 мкс и длительностью переднего фронта $\tau_Ф$ = 50 нс.

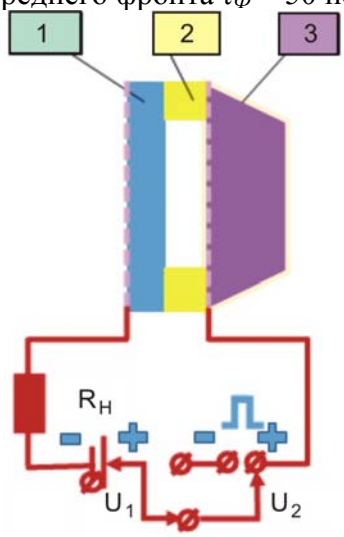

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сверхтонкой газоразрядной ячейки. 1 – фоточувствительная к ИК-излучению полупроводниковая пластинка с прозрачным электродом, 2 – слюдяная пластинка с отверстием в центре, 3 – волоконно-оптическая шайба со SnO_2

Максимальная величина импульсного напряжения составляло U_2 = 1,6 кВ, с выходным сопротивлением 100 Ом. Для регистрации постоянного тока использован двухкоординатный самопищущий лабораторный комплекс типа ЛКД4-003, а для регистрации токового импульса – двухлучевой осциллограф типа С1-91, регистрировавший падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_H.

Авторами разработан метод усреднения, основанный на изменении оптической плотности изображения осциллограммы тока, сфотографированной с экрана осциллографа на фотопленку. Суть метода заключается в том, что, поскольку фотографическое действие газового разряда ячейки на регистрирующую среду определяется величиной среднего количества электричества, нас интересовали не только значения тока в каждом индивидуальном импульсе, но и средние значения тока за период. Поэтому экспериментальная задача состояла в определении среднего тока, усредненного для каждого момента времени по общему количеству импульсов за время экспонирования.

Действительно, принимая, что оптическая плотность почернения пропорциональна количеству импульсов для каждого момента времени, можно считать, что среднее значение тока в данный момент времени определяется следующим соотношением:

$$i_\tau = i_{\tau\,\max}\frac{n}{N} = i_{\tau\,\max}\frac{D}{D_{\max}} \qquad (1)$$

где n – количество токовых импульсов для данного момента времени; N – полное число импульсов напряжения; D – оптическая плотность на осциллограмме, соответствующая числу импульсов для данного момента времени ($D \sim n$); $D_{\max}$ – максимальная оптическая плотность на осциллограмме, соответствующая полному числу импульсов ($D_{\max} \sim N$).

Таким образом, проводя денситометрирование осциллограмм, можно получить усредненную форму токового импульса. Способ получения кинетики среднего тока из денситометрирования осциллограмм схематически пояснен на рис. 2а, где оптическая плотность на осциллограмме условно изображена линиями разной толщины, а плавная штрихпунктирная кривая на рис. 2б показывает полученную кинетику среднего тока. Осциллограмма снималась на аэрофотопленку-42 фотоаппаратом «Зенит-Е» с объективом «Гелиос» и дополнительным переходным кольцом. Денситометрирование фотоснимков осуществлялось на микроденситометре типа ИФО-451 с шириной щели, обеспечивающей разрешение 20 лин/мм. Во всех измерениях мощность излучения измерялась термостолбиком типа ЛЭТИ с чувствительностью 0,72 В/Вт.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Кинетика пробоя в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом из высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом

Для исследования кинетики тока и задержки пробоя были обработаны вышеописанным денситометрическим методом осциллограммы тока сверхтонкой газоразрядной ячейки.

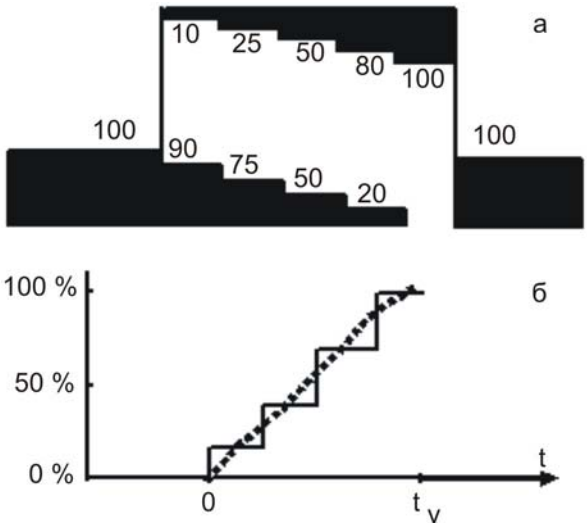

Рис. 2. а) Схематически – распределение оптической плотности почернения на осциллограмме токового импульса, б) Временная зависимость среднего тока, полученная из осциллограммы (а)

В этом случае между полупроводниковым фотоприемником из арсенида галлия, компенсированного хромом и волоконно-оптической шайбой подавалось импульсное напряжение порядка 1,6 кВ с высоковольт-

ного тиратронного генератора. Остаточное давление воздуха составляло 0,2 атм, толщина газового промежутка в одном опыте – 40 мкм, а в другом – 100 мкм, освещение осуществлялось белым светом на ОИ-24, мощность которого измерялась термостолбиком.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма напряжения и тока при подаче на ячейку одиночного импульса напряжения. Как видно из рисунка, после первого емкостного выброса тока (ток смещения) через определенное время задержки, зависящее от освещенности полупроводника, наблюдается второй выброс тока в момент пробоя газоразрядного зазора, переходящий в горизонтальный участок протекания стационарного сквозного тока. Таким образом, второй всплеск тока связан с переходным процессом в электрической цепи (рис. 1), начинающимся в момент пробоя газового промежутка.

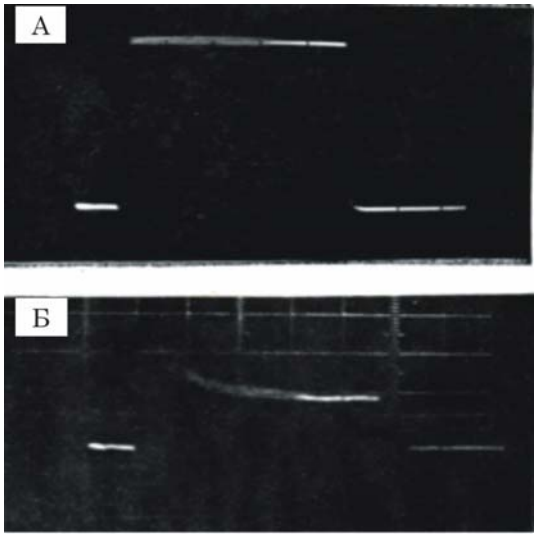

Рис. 3. Осциллограммы напряжения (А) и тока (Б) в газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом из арсенида галлия, компенсированного хромом

На рис. 4а и рис. 4б приведены временные зависимости величины среднего тока при различных значениях освещенности полупроводника и постоянной для каждой серии величины импульсного напряжения, полученные денситометрическим методом для двух значений толщины зазора.

На рис. 5 представлены зависимости времени задержки пробоя от интенсивности освещения для двух значений толщины зазора. Задержка пробоя уменьшается с ростом освещенности фотоприемника и при увеличении толщины газоразрядного зазора.

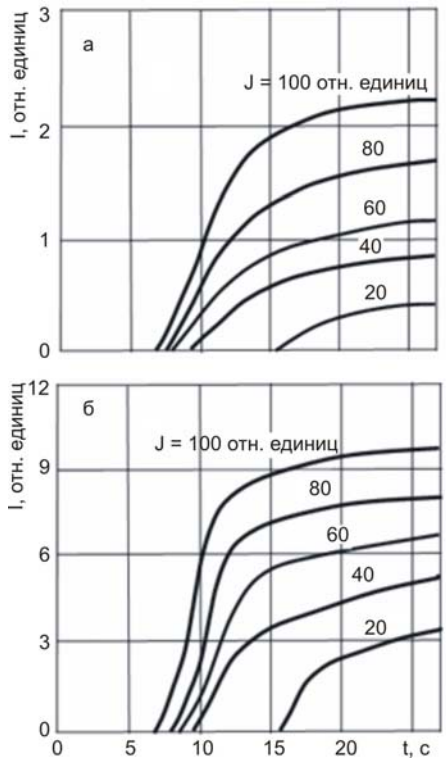

Рис. 4. а). Серия временных зависимостей среднего тока при различных значениях интенсивности освещения при толщине зазора d = 40 мкм; б). То же что и на рис. 4,а при толщине зазора d = 100 мкм

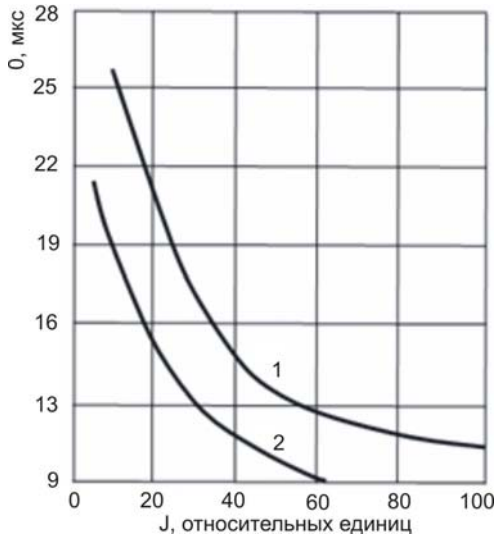

Рис. 5. Зависимость времени задержки пробоя от интенсивности освещения полупроводника при различных величинах толщины зазора. Толщина зазора равна: 1 – 40 мкм, 2 – 100 мкм

Полученные кривые фототока позволили построить зависимости среднего тока в импульсе от интенсивности света при различ-

ных значениях длительности импульса напряжения. На рис. 6а и рис. 6б приведены такие зависимости для двух значений толщины газоразрядного зазора.

2.2. Электростатические явления в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом из кремния, легированного платиной

Для исследования переходных процессов электростатического характера последовательно к сверхтонкой газоразрядной ячейке были подключены источники постоянного тока и высоковольтный импульсный тиратронный генератор. В этом случае фотоприемником ячейки является кремний, легированный платиной [8], который охлаждается до T = 80 К, толщина газоразрядного зазора составляет 40 мкм, давление остаточного воздуха – 0,2 атм. Для усиления свечения разряда использовался электронно-оптический преобразователь типа ЭП-16 (Производство России). При приложении к ячейке постоянного напряжения 550 В зажигается стационарный разряд и наблюдается равномерное свечение при плотности тока $10^{-8} \div 10^{-7}$ А/см^2. Если дополнительно к ячейке подать короткий (25 мкс) импульс напряжения 1,6 кВ той же полярности, свечение разряда исчезает и затем постепенно восстанавливается. Картина восстановления свечения разряда в разные моменты времени после импульса напряжения показаны на рис. 7.

В более чистом виде электростатические явления наблюдаются в отсутствие постоянного сквозного тока в следующей постановке опыта. На ячейку подается короткий (25 мкс) прямоугольный импульс напряжения 1,6 кВ, вызывающий пробой газового зазора и соответственно вспышку равномерного по площади свечения. Через определенный промежуток времени Θ подается второй импульс напряжения той же полярности. При этом, если к моменту Θ суммарное поле в зазоре, равное разности внешнего поля $E_{имп}$ и поля поверхностных зарядов $E_{заряд}$, в ходе релаксации достигает напряженности пробоя $E_{пр}$, наблюдается вспышка разряда. Как раз для этого случая фиксируется время Θ. Если вспышка разряда не наблюдается, то пороговое время пробоя Θ при указанных параметрах больше и для данного случая с моментом подачи второго импульса необходимо повременить. Таким образом, подбором случайных ошибок определяется истинное значение Θ.

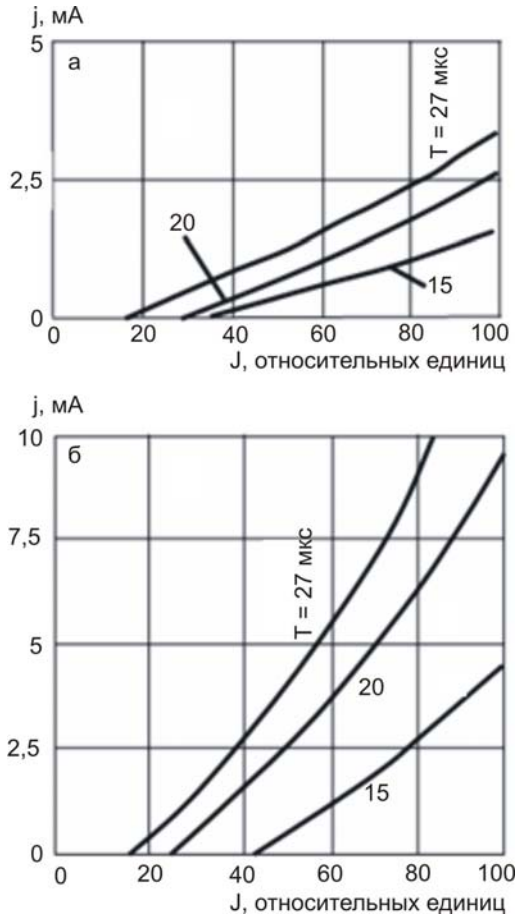

Рис. 6. а). Ваттамперные характеристики ПФИК при различных значениях длительности импульса напряжения при толщине зазора d = 40 мкм; б). То же при толщине зазора d = 100 мкм

На рис. 8 приведена полученная на опыте зависимость пороговой величины времени пробоя Θ от освещенности полупроводника J, увеличивающая его проводимость (интенсивность освещения измерялась термостолбиком).

На рис. 9 приведена полученная на опыте зависимость интенсивности свечения разряда I (измерялся фототок ФЭУ-19А, соответствующий интенсивности свечения разряда) от порогового времени пробоя Θ для темнового тока (кривая 1) и для инфракрасного излучения с длиной волны 3,6 мкм при мощности ~10^{-9} Вт/см^2 (кривая 2).

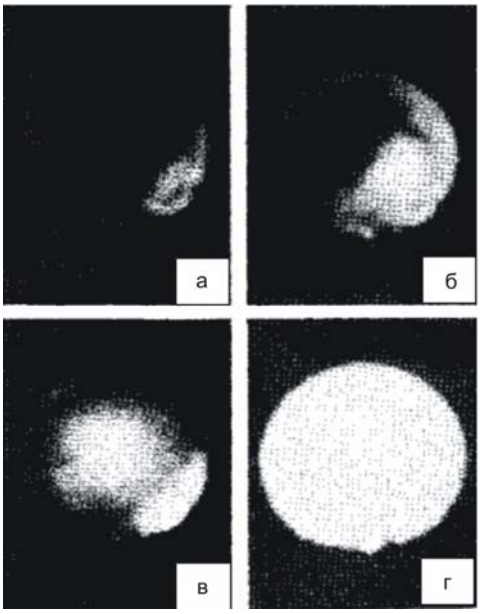

Рис. 7. Картина свечения разряда в разные моменты времени после импульса напряжения: а) – через 4 *с*; б) – 8 *с*; в) – 12 *с*; г) – 20 *с*

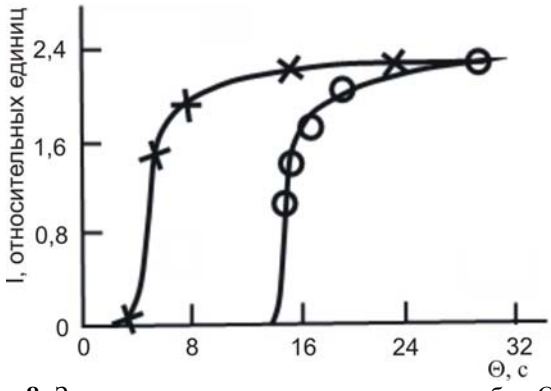

Рис. 8. Зависимость порогового времени пробоя Θ от освещенности полупроводника J

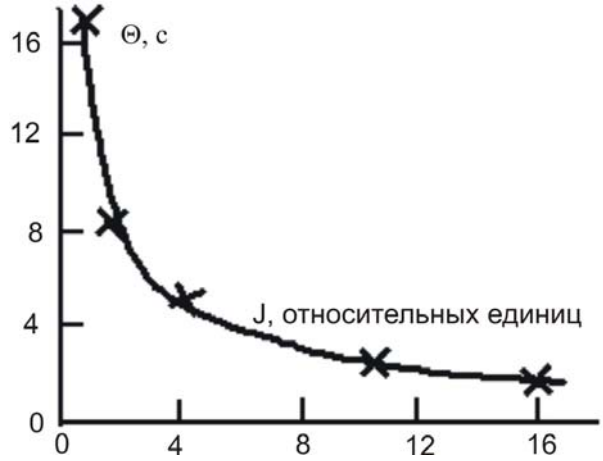

Рис. 9. Зависимость интенсивности свечения разряда от пороговой величины времени зажигания разряда после подачи второго импульса напряжения: 1 – в темноте, 2 – при освещении ~10^{-9} Вт/см^2

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Прежде чем приступить к обсуждению результатов, считаем, целесообразным рассмотрение вопроса о процессе пробоя газового зазора с точки зрения теоретического анализа.

Расчет временной зависимости напряжения на газоразрядном зазоре *U(t)* до пробоя может быть выполнен аналогично задаче о зарядке двухслойного конденсатора [9], один из слоев которого полупроводник, имеет диэлектрическую проницаемость ε_1, толщину d_1 и удельную проводимость σ_1, а второй слой – газовый промежуток, имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_2 = 1$, толщину d_2 и удельную проводимость $\sigma_2 = 0$:

$$U(\tau)=U_0\Bigg/\left(\frac{R_1}{4\pi d_2}\left(\frac{1}{\tau_2}-\frac{1}{\tau_1}\right)\right)\left[\left(\frac{4\tau\sigma_1\tau_1}{\varepsilon_1}-1\right)\exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)-\frac{4\pi\sigma_1\tau_2}{\varepsilon_1 d_1}\exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)-\frac{4\pi\sigma_1}{\varepsilon_1(\tau_1-\tau_2)}\right], \qquad (2)$$

где $\tau_1=\dfrac{R\varepsilon_1}{\dfrac{16\pi^2 d_1 d_2}{\dfrac{\varepsilon_1}{\pi d_1}+\dfrac{1}{\pi d_2}}}$; $\tau_2\dfrac{d_1}{\sigma_1}\left(\dfrac{\varepsilon_1}{\pi d_1}+\dfrac{1}{\pi d_2}\right)$

U_0 – подаваемое напряжение; R – внутреннее сопротивление источника напряжения.

При пренебрежимо малой величине внутреннего сопротивления генератора поданное напряжение в начальный момент времени перераспределяется обратно пропорционально емкостям:

$$\frac{U}{U_0-U}=\frac{U}{\varepsilon_1 d_2}. \qquad (3)$$

Затем с постоянным временем τ_2 все напряжения переходят на разрядный зазор. Таким образом, пробой зазора происходит в условиях возрастающего на нем напряжения.

Поскольку σ_1 зависит от освещения, величина задержки пробоя определяется временем $\Theta = \tau_2 = f(\sigma_1)$. Другой определяющий задержку пробоя фактор – естественный статистический разброс времени пробоя, являющийся единственной причиной задержки пробоя в ячейке с эквипотенциальными электродами. Следовательно, общее время задержки определяется двумя составляющими: временем задержки емкости разрядного зазора через освещенный полупроводник и временем статистической задержки пробоя при данном напряжении в зазоре. Исследование задержки пробоя в газоразрядной ячейке ПФИК представляет прикладное значение.

Исходя из данной задачи, был поставлен опыт. Сначала были построены зависимости кинетики тока в газоразрядной ячейке денситометрическим методом из осциллограммы тока. Из приведенных кривых на рис. 4 следует, что за время импульса напряжения релаксационные кривые среднего тока приходят к стационарному значению, величина которого зависит от освещения. Задержка пробоя, определенная как время достижения током половинной величины стационарного значения, и величина разброса времени задержки пробоя (наклон кривой) уменьшается с ростом освещенности. Кроме того, среднее значение тока при толщине газоразрядного зазора 100 мкм в три с лишним раза больше чем при толщине 40 мкм. По-видимому, это оптимальный случай при импульсном режиме работы ПФИК. Приведенные кривые на рис. 6, зависимости среднего тока в импульсе от интенсивности света (ваттамперные характеристики ПФИК) демонстрирует характерную особенность кривых, то есть «пороговый» вид этих зависимостей, что является следствием эффекта задержки пробоя. При увеличении длительности импульса напряжения уменьшается пороговое значение интенсивности освещения, ниже которого ток проводимости в ПФИК, а следовательно и свечение разряда отсутствуют. Отметим также, что, начиная с порогового значения, фототок резко возрастает с увеличением интенсивности света. Полученные «пороговые» зависимости среднего тока с регулированием величины порога представляют значительный интерес, являясь в принципе методом дискриминации фона.

Теперь переходим к обсуждению результатов исследования электростатистического явления происходящих на поверхности полупроводникового фотоприемника в сверхтонкой газоразрядной ячейке ПФИК. Здесь необходимо отметить, что сверхтонкая газоразрядная ячейка в ПФИК работает в двух режимах: 1 – ждущий режим, когда к ячейке подключен источник питания постоянного тока, в данном случае ячейка как бы ждет световой информации для регистрации; 2 – импульсный стробирующий режим, в этом режиме работы на постоянном фоне излучения регистрируемого объекта подается на ячейку импульсное высокое напряжение. Нами для выявления закономерностей переходных процессов в сверхтонкой газоразрядной ячейке были задействованы одновременно оба режима подачи напряжения на ячейку. Когда к ячейке подается напряжение постоянного тока достаточной величины для пробоя, то на фоне постоянной интенсивности излучения объекта, на экране ПФИК наблюдается равномерное свечение разряда (рис. 7г). Если дополнительно к ячейке подается высокое импульсное напряжение, в нашем случае 1,6 кВ, то свечение разряда гаснет. После этого разряд, то есть изображение объекта восстанавливается через определенное время. Как видно из рис. 8, это время Θ зависит от интенсивности излучения объекта. В свою очередь, данная величина также зависит от величины интенсивности свечения разряда (рис. 9). Последний результат привел нас к размышлению о том, что интенсивность разряда I пропорциональна квадрату действующего к моменту пробоя электрического поля $E_{пр}^2 = \left(E_{имп} - E_{заряд}\right)^2$ и имеет пороговый характер этой зависимости качественно соответствующий теоретическому соотношению

$$I = \left\{ \alpha\left(E_{имп} - E_{пр}\right)\left[1 - \frac{E_{заряд}\exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)}{E_{имп} - E_{пр}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

где $E_{имп}$ – напряженность поля, подаваемого импульса напряжения, $E_{зпряд}$ – напряженность поля поверхностных зарядов, τ – максвелловское время в полупроводнике, α – постоянный коэффициент.

Следует отметить возрастание разброса по интенсивности свечения и по моменту зажигания разряда по мере приближения к пороговому моменту времени, что связано, по-видимому, с неоднородностью проводимости полупроводника и дисперсией задержки пробоя (рис. 7).

Электростатические явления подобного типа определяются своеобразием переходных процессов в ионизационных приборах и, с другой стороны, могут служить эффективным инструментом изучения физики газового разряда с распределенным сопротивлением электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдаров З. Особенности автоэлектронной эмиссии в сверхтонком зазоре газоразрядной ячейки в полупроводниковой ионизационной камере // ФИП. – 2006. – Т. 3, № 1-2. – С. 207.
2. Касымов Ш. С., Хайдаров З., Йулдашев Х. Т. Исследование влияния токового усиления на фотоэлектрографические и выходные характеристики преобразователя изображений ионизационного типа // ФИП. – 2011. – Т. 9, № 4. – С. 376.
3. Хайдаров З. // Исследование сверхтонкой газоразрядной ячейки с полупроводниковым электродом из кремния легированного платиной // ФИП. – 2011. – Т. 9, № 4. – С.385.
4. Хайдаров З., Хайдаров К. З., Йулдашев Х. Т. Высокочувствительная полупроводниковая ионизационная фотографическая камера для инфракрасного диапазона // Прикладная физика. – 2017, № 1. – С. 65-69.
5. Астров Ю. А., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М. Гексагональные структуры тока в системе «полупроводник – газоразрядный промежуток» // ЖТФ. – 2011. – Т. **81(2).** – С. 42-47.
6. Пугачев В. С. // Теория вероятностей и математическая статистика // М.: Наука, 1968.
7. Blaszuk P. R. Patent USA. Int.Cl.HOI 17/06. 3.743.881 (July 3, 1973).
8. Хайдаров З. и др. // Патент России № 1697572, от 8 августа 1991 г.
9. Сканави С. В. // Физика диэлектриков (Область слабых полей) // М.: Наука, 1979.

REFERENCES

1. Haydarov Z. Osobennosti avtoelektronnoy emissii v sverhtonkom zazore gazorazryadnoy yacheyki v poluprovodnikovoy ionizatsionnoy kamere // FIP. – 2006. – T. 3, # 1-2. – S. 207.
2. Kasyimov Sh. S., Haydarov Z., Yuldashev H. T. Issledovanie vliyaniya tokovogo usileniya na fotoelektrograficheskie i vyihodnyie harakteristiki preobrazovatelya izobrazheniy ionizatsionnogo tipa // FIP. – 2011. – T. 9, # 4. – S. 376.
3. Haydarov Z. // Issledovanie sverhtonkoy gazorazryadnoy yacheyki s poluprovodnikovym elektrodom iz kremniya legirovannogo platinoy // FIP. – 2011. – T. 9, # 4. – S.385.
4. Haydarov Z., Haydarov K. Z., Yuldashev H. T. Vysokochuvstvitelnaya poluprovodnikovaya ionizatsionnaya fotograficheskaya kamera dlya infrakrasnogo diapazona // Prikladnaya fizika. – 2017, # 1. – S. 65-69.
5. Astrov Yu. A., Lodygin A. N., Portsel L. M. Geksagonalnyie struktury toka v sisteme «poluprovodnik – gazorazryadnyi promezhutok» // ZhTF. – 2011. – T. 81(2). – S. 42-47.
6. Pugachev V. S. // Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika // M.: Nauka, 1968.
7. Blaszuk P. R. Patent USA. Int.Cl.HOI 17/06. 3.743.881 (July 3, 1973).
8. Haydarov Z. i dr. // Patent Rossii # 1697572, ot 8 avgusta 1991 g.
9. Skanavi S. V. // Fizika dielektrikov (Oblast slabyh poley) // M.: Nauka, 1979.