

УДК 621.315.592:621.382:621.385

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКИ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Хайдаров З^{1.}, Хайдаров Б.З^{2.}

¹Ферганский Государственный университет

²Ферганский политехнический институт

E-mail: zokir_nursuh@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований изучения физических процессов в газоразрядной ячейке с полупроводниковыми электродами. Экспериментально подтверждается, что основной механизм формирования изображения в полупроводниковой ионизационной камере является автоэлектронная эмиссия. В рамках этой работы установлено, что обнаруженный эффект в виде нормального изменения фототоков и аномального изменения темнового токов, обеспечивает разрешающую способность фотографического процесса в газоразрядной ячейке полупроводниковой ионизационной камеры.

Ключевые слова: газоразрядная ячейка, фотоэлектроника, ионизационная камера, кремний, платина, арсенид галлий, фотоэлектрический гистерезис, фотографический эффект.

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies of the study of physical processes in a gas-discharge cell with semiconductor electrodes. It is experimentally confirmed that the main mechanism of image formation in a semiconductor ionization chamber is field emission. As part of this work, it was found that the detected effect in the form of a normal change in photocurrents and an anomalous change in dark currents provides the resolution of the photographic process in a gas-discharge cell of a semiconductor ionization chamber.

Keywords: gas discharge cell, photoelectronics, ionization chamber, silicon, platinum, gallium arsenide, photoelectric hysteresis, photographic effect.

ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядная ячейка с плоским полупроводниковым электродом нашла достаточно широкое применение в области фотоэлектроники при регистрации оптического и инфракрасного излучения [1-10]. С уменьшением газового зазора

газоразрядной ячейки в полупроводниковой фотографической ионизационной камере (ПФИК) существенно расширяется область пространственной стабилизации тока, так по диапазону давлений газа, так и по значениям допустимых приложенных напряжений [2, 3]. В последнее время расширяется круг используемых полупроводниковых материалов в ПФИК [11-19]. Полная картина процессов в газоразрядной ячейке при малых зазорах ($10 \div 100$ мкм) не может быть удовлетворительно интерпретирована в рамках простой теории газового разряда [4,5]. Условия возникновения разряда в этих зазорах достаточно неизучены.

Впервые идеи по созданию полупроводниковой фотографической системы для регистрации инфракрасного излучения с управляемым электронным затвором и полупроводниковым электродом давал С.М. Рывкин в 1970 году [6]. В 1972 году эту идею решили, применят для ПФИК с газоразрядным зазором.

После постановки задачи С. М. Рывкиным, Ш. С. Касымов и Л. Г. Парицкий вели поиск для решения этой проблемы и только через год подобрали условие для фотографирования объектов в газоразрядной ячейке [7]. Однако до сих пор нет удовлетворительного объяснения для механизма происходящих физических процессов в газоразрядной ячейке. В настоящей работе приводятся результаты исследования, которые объясняют механизмы происходящих процессов в газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом, длина которой составляет от 10 до 100 мкм.

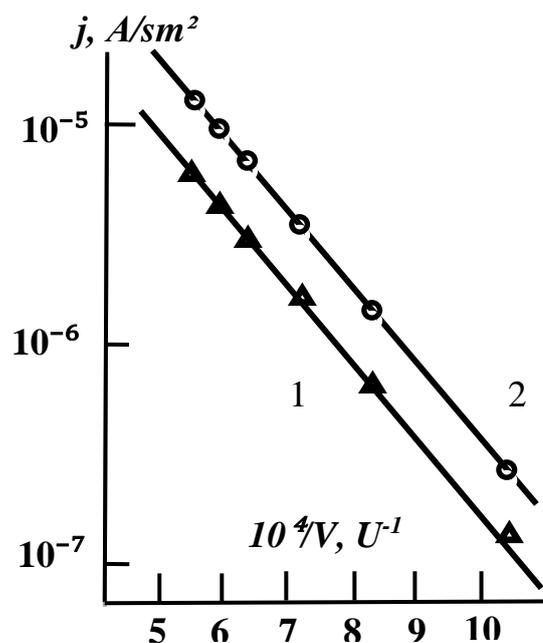


Рис. 1. Вольтамперные характеристики автоэлектронной эмиссии с GaAs: 1 - в темноте, 2 - при освещении.

Методы исследования

Исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились в следующей конфигурации элементов, состоящих из пластины кремния, легированного платиной – $Si<Pt>$ [8] для работы при охлажденном варианте камеры. В этой камере внутренняя поверхность фотоприемников была отделена от контрэлектрода из волоконно-оптической шайбы с проводящим прозрачным

покрытием, диэлектрической пластиной из слюды, имеющей в центре круглое сквозное отверстие.

Были проведены исследования тока газоразрядной ячейки при относительно высоком вакууме, когда длина свободного пробега электрона значительно превосходит толщину разрядного зазора и полностью исключается ионизация газа в камере изготовленного из полистирола. При этом исследование проводилась при комнатной температуре с пластиной из монокристаллического арсенида галлия – *GaAs*.

Нами, также были исследованы влияние автоэлектронной эмиссии на фото-термоэлектрические характеристики газоразрядной ячейки в ПФИК при охлажденном варианте камеры. Фотоприемник из *Si<Pt>* был охлажден до температуры жидкого азота, затем температура медленно поднималась. При этом наблюдались темновые и фототоки газоразрядной ячейки. Эксперимент проводился при остаточном давлении газа (воздуха) 0,2 атм. В ПФИКе между фотоприемником и контрэлектродом подавалось постоянное напряжение 1200 В. Интенсивность освещения имела значение 10^{-4} Вт/см² в области длин волн $\lambda = 2,4$ мкм.

Результаты исследования

На рис. 1 приведены ВАХ газоразрядной ячейки при толщине газоразрядного зазора $d = 10$ мкм в темноте (кривая 1) и при освещении

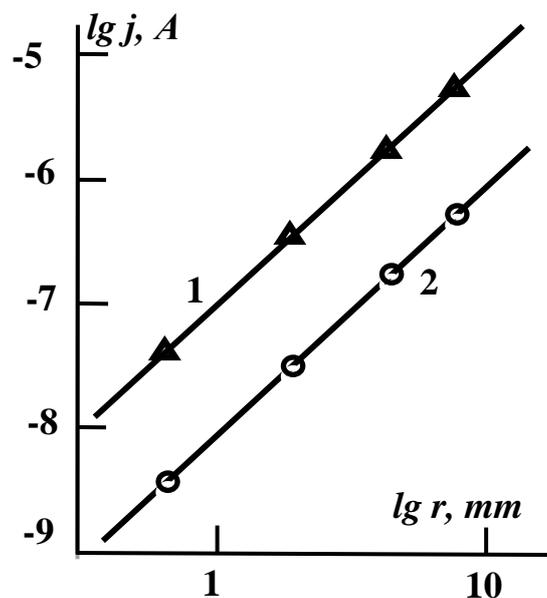


Рис. 2. Зависимость автоэлектронного тока от радиуса отверстия в диэлектрической прослойке. V, кВ: 1 - 1,5; 2 - 1.

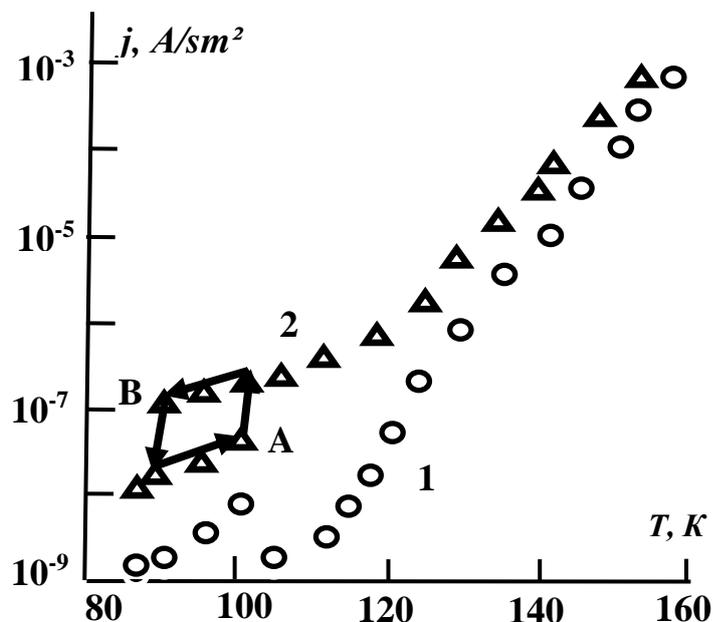


Рис. 3. Температурные зависимости темнового (кривая 1) и фототоков (кривая 2) в ПФИК с фотоприемником из *Si<Pt>*.

(кривая 2) фотоприемника из $GaAs$. Очевидно, что природа тока здесь может быть связана с автоэлектронной эмиссией, либо с утечкой по поверхности диэлектрического зазора в сильном электрическом поле по периметру отверстия, ограничивающего вакуумный зазор, то есть за счет краевого эффекта. Для разрешения этой альтернативы были проведены измерения ВАХ при нескольких значениях диаметра сквозного отверстия в диэлектрической слюде. При этом предполагалось, что при преобладающем токе утечки величина общего тока с ростом диаметра будет возрастать линейно (соответственно увеличению длины окружности отверстия), а при преобладании автоэлектронной эмиссии – квадратично (соответственно увеличению площади отверстия).

На рис. 2 приведены результаты измерений, из которых однозначно следует, что ток возрастает, пропорционально площади поперечного сечения и краевая утечка не вносит существенного вклада.

На рис. 3 приведены температурные зависимости темнового и фототоков, откуда видно, что в основном, они повторяют полученные нами результаты предыдущей работы [11]. Однако в области низких температур ($T = 85 \div 105 \text{ K}$) имеет место скачкообразное изменения токов, причем зависимость фототока является нормальным, а темнового тока – аномальным.

На рис.4 приведены характеристические кривые фотографического процесса с использованием фотографической регистрации фотокамерой с объективом, обладающим светосилой 1:2, на фотопленку, типа РФ-3. Кривая 1 соответствует фотографической регистрации без усиления инфракрасного

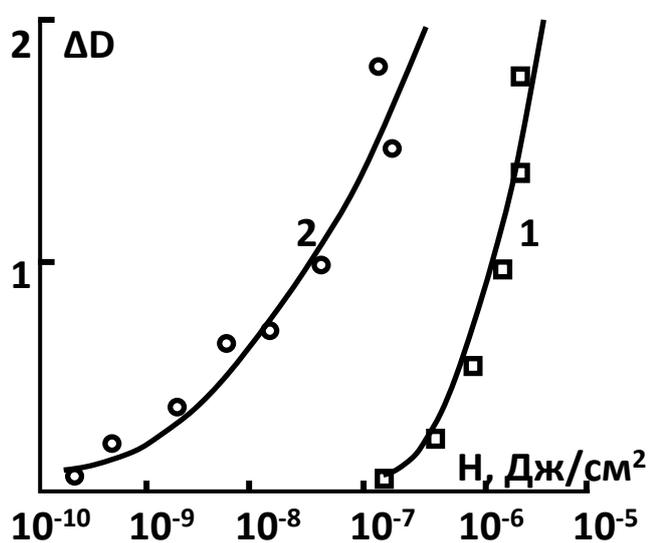


Рис. 4. Характеристическая кривая (абсолютной величины оптической плотности изображения от экспозиции) фотографического процесса в ПФИК для спектрального диапазона длин волн $\lambda = 2,6 \div 4,2 \text{ мкм}$: 1 – без усиления инфракрасного изображения; 2 – усиленное инфракрасное изображение с помощью ЭП-16.

изображения, а кривая 2 – фотографической регистрации усиленного инфракрасного изображения с экрана ЭП–16.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенных на рис. 1 вольтамперных зависимостях экспериментальные точки удовлетворительно располагаются по прямым линиям. Это свидетельствует о выполнении функциональной зависимости для автоэлектронного тока, определяемой известной формулой Фаулера-Нордхейма [9], модифицированной [10] с учетом эффекта Шоттки,

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp \left[\frac{6,86 \cdot 10^7 \varphi^{\frac{3}{2}}}{E} f(y) \right],$$

где j – плотность тока в A/cm^2 , E – напряженность поля в V/cm , φ – работа выхода в эВ, $f(y)$ – эллиптическая функция Нордхейма.

Полученные экспериментальные результаты, по-видимому, можно объяснить следующим образом: автоэлектронную эмиссию при темновом токе образуют равновесные носители тока. Их концентрация при низких температурах намного меньше, с повышением температуры их число и, тем самым, сила тока растет. Однако энергия равновесных электронов, вырванных автоэмиссией с поверхности полупроводника недостаточна для образования лавин таунсенда. В наших условиях при температуре 100 K темновой ток скачкообразно падает (рис. 3). Основная часть равновесных электронов, вырванных автоэмиссией с поверхности фотоприемника, ускоряется в электрическом поле. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению числа равновесных носителей и нарастанию темнового тока (кривая 1). Фототок (кривая 2) в области температур ~ 100 K имеет скачок вверх, это наблюдается при повышении температуры по пути A . При снижении температуры по пути B , то есть при охлаждении системы, фототок в области температур ~ 90 K скачком падает. Таким образом, в сверхтонкой газоразрядной ячейке с фотоэлектродом из кремния, легированного платиной (Si<Pt>) при неравновесных процессах наблюдается **фотоэлектрический гистерезис**, связанный с автоэлектронной эмиссией. С самого начала концентрация неравновесных носителей, вырванных автоэмиссией всегда больше, только лишь их интенсивность недостаточно для лавин таунсенда. При повышении температуры равновесные носители играют роль подачи дополнительной энергии для размножения ионов. И с этого момента со скачком начинается таунсендовский разряд.

Заметим, что скачкообразное уменьшение темнового тока и скачкообразное увеличение фототока – есть **новый положительный эффект**, влияющий на увеличение контрастности (кратности – отношение фототока к темновому току), то есть на чувствительность ПФИК.

Необходимо отметить, что подобное явление в неохлаждаемом варианте, то есть при комнатной температуре с фотоприемником из GaAs не наблюдается. Здесь, по-видимому, неравновесных носителей при комнатной температуре всегда достаточно для образования лавин таунсенда. Однако, можно заметить, что в этом случае при подаче достаточного пробивного газового зазора напряжения, сначала развивается таунсендовский разряд и затем мгновенно начинается тлеющий разряд. Поэтому вышеуказанный эффект не наблюдается.

Как следует из приведенных характеристических кривых (рис.4), фотографическая чувствительность определяется величиной порядка $(0,4 \div 0,5) \cdot 10^7$ см²/Дж без усиления, а с усилением на электронно-оптическом преобразователе типа ЭП-16 производство России, это величина составляет $(0,4 \div 0,5) \cdot 10^9$ см²/Дж. Для выше указанного спектрального диапазона длин волн достигнутая фотографическая чувствительность является достаточно высокой. Заметим, что при этом на экране ЭП-16 визуально наблюдается достаточно четкое изображение.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что наличие автоэлектронной эмиссии оказывает положительное воздействие на пространственную стабилизацию газового разряда. Поток электронов, вырывааемых полем из фотокатода, не только обеспечивают условия развития таунсендовского или тлеющего разрядов, но и, приводит к интенсивной нейтрализации объемного заряда положительных ионов в разрядном промежутке, и тем самым устраняет искажения распределения электрического поля в газоразрядной ячейке. Экспериментальными данными, полученными в [12], при малой величине разрядных промежутков это подтверждается. Автоэлектронная эмиссия при газовом заполнении играет роль поставщика электронов для лавин таунсендовского или тлеющего разрядов в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Отметим, что наблюдаемый автоэлектронный ток контролируется фотосопротивлением полупроводника, то есть интенсивностью излучения, при этом изображение объекта получается отчетливо контрастным. Фотографирование объектов при инфракрасном

излучении с помощью ПФИК всегда надёжны и просты с высокой разрешающей способностью ($10\div 15$ лин/мм) [20-33].

REFERENCES

1. Haydarov, Z., & Juraev, N. (2008, June). PHOTOGRAPHIC PROCESS IN THE SUPERTHIN BACKLASH OF THE DISCHARGE CELL IN SEMICONDUCTOR OF THE IONIZATION CAMERA. In *ICEIC: International Conference on Electronics, Informations and Communications* (pp. 1118-1118).
2. Paritskii L.G., Khaidarov Z. et al. Spatial stabilization of the current in semiconductor – gas discharge system, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.* 11-12, 2017 (1993) [*Sov. Phys. Semicond.* 11-12, 1104 (1993)].
3. Haydarov Z. Advanced semiconductor Ionization Chamber on the Basis of an Image Intensifier (II) at the Thermoelectric Cooling. Abstracts on XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photo electronics and Night Vision, May 25 – 28, 2004, Moscow, p. 109.
4. Raiser Yu. P. *Physics of the Gas Discharges* [in Russian], Moscow (1987).
5. Howatson A. M. *An Introduction to Gas Discharges*, Pergamon Press Ltd., New York (1976).
6. Paritskii L. G. and Rifkin S. M., *Fiz. Tekh. Poluprovodn.* 4, 754 (1970) [*Sov. Phys. Semicond.* 4, 645 (1970)].
7. Касымов Ш.С. Автореферат кандидатской диссертации. ФТИ имени А. Ф. Иоффе. Ленинград, 1976 г.
8. Хайдаров З. и др. //Авторское свидетельство России №1672879 от 22.04.1991.
9. R. N. Fowler, L. W. Nordheim //*Procs. Roy. Soc.*, A119, 175 (1928).
10. L. W. Nordheim //*Procs. Roy. Soc.*, A181, 626 (1928).
11. Хайдаров, З. (2006). Особенности автоэлектронной эмиссии в сверхтонком зазоре газоразрядной ячейки в полупроводниковой ионизационной камере. *Физическая инженерия поверхности. Украина*, 3(1-2), 207-209.
12. Haydarov, Z. (2004). Advanced Semi-Conductor Ionization Chamber on the Basis of an Image Intensifier (II) at the Thermoelectric Cooling. In *Abstracts on XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photo electronics and Night Vision Devices* (p. 109).
13. Хайдаров З. //Фотоэлектрический эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Тезисы докладов в XIX

Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 23 – 26 мая 2006, Москва, Россия, с. 212.

14. Astrov Yu. A., Portsel L. M., Lodygin A. N., Shuman V. B. Gas-phase doping of silicon with sulfur. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, v. 26, p. 5.

15. Gurevich E. L., Kittel S., Hergenroder R., Astrov Yu. A., Portsel L. M., Lodygin A. N., Tolmachev V.F., Ankudinov A. V. Modification of GaAs surface by low-current Townsend discharge. *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2010, v. 43, p. 27.

16. Astrov Yu. A., Portsel L. M., Lodygin A. N., Shuman V. B., Abrosimov N. V. Planar sulfur-doped silicon detectors for high-speed infrared thermography. *Infrared Phys. Technol.*, 2009, v. 52, No. 1, pp. 25-31.

17. Portsel L. M., Lodygin A. N., Astrov Yu. A. Townsend-like discharge: the suppression of instabilities by a semiconductor electrode. *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2009, v. 42, p. 23.

18. Astrov Yu. A., Portsel L. M., Lodygin A. N., Shuman V. B. Planar microdischarge device for high-speed infrared thermography: Application of selenium-doped silicon detectors. *J. Appl. Phys.*, 2008, v. 103, p. 11.

19. Astrov Y. A., Shuval-Sergeev N. A., Beregin E. V., Lodygin A. N., Portsel L. M. Control of the breakdown delay time in a micro-discharge system by small dc bias current. *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2008, v. 41, p.13.

20. Хайдаров, З., Хайдарова, К. З., & Йулдашев, Х. Т. (2017). Высокочувствительная полупроводниковая ионизационная фотографическая камера для инфракрасного диапазона. *Прикладная физика*, 1, 65-69.

21. Хайдаров З., Йулдашев Х.Т. Новый эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке полупроводниковой ионизационной камеры для инфракрасного фотографирования IV международная конференция. // «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред», Самарканд, 2013 год 29-31 май, Ст. 169-170.

22. Хайдаров З., Касымов Ш.С. Исследование влияния токового усиления преобразовательных и выходных характеристик преобразователя изображений ионизационного типа. “Вестник Санкт-Петербургского Государственного университета, 2017, №3, ст 13-19.

23. Касымов Ш.С., Хайдаров З., Йулдашев Х.Т. Усилительные процессы в узкой ионизационной системе с полупроводниковым электродом // «Современные проблемы физики – 2016» 8-10 июня 2016 г. Минск, Беларусь. Ст. 116-119.

24. Хайдаров Б.З., Йулдашев Х.Т., Урмонов С.Р., Мирзажонов З. Исследование характеристик полупроводниковых фотографических систем ионизационного типа // Сборник статей по материалам XXVIII-XXIX международной научно-практической конференции.- Москва, изд. «Интернаука» 2015, ст. 118-123.
25. Абдурахмонов К.П., Хайдаров Б.З., Йулдашев Х.Т. Исследование кинетика пробоя в газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Материалы III международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Фергана, 2014. Ст. 139-142.
26. Utamuradova Sh. B., Saparov F.A., Khaydarov Z. Physical processes at the semiconductor-plasma contact of a gas discharge in a thin gas-discharge cell // Science and world International scientific journal, 2021, №9 (97), ст. 8.
27. Utamuradova Sh. B., Daliev Kh. S., Khaydarov Z., Rakhmanov D.A. Effective method for photographic recording of heat fields of objects and laser radiations based on a gas discharge cell // Academician: An International Multidisciplinary Research Journal, Vol 11, Issue 9, September 2021, ст.29-33.
28. Хайдаров З., Хайдаров Б.З., Сапаров Ф.А., Юлдашев Х.Т. Физические свойства на контакте полупроводник – плазма газового разряда в тонкой газоразрядной ячейке // Научно технический журнал Фер ПИ, 2021, Том 25, №3, ст.115-118.
29. Далиев Х.С., Хайдаров З., Йулдашев Х.Т., Юлдашев Н.Х. Неравновесные процессы на контакте полупроводник – плазма газового разряда // Физика полупроводников и микроэлектроника, 2019, т.1, в.4, ст. 22-29.
30. Хайдаров З., Йулдашев Х.Т. Переходные фотоэлектрические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковыми электродами. // Журнал физики и инженерии поверхности, 2018, том 3, № 3, ст. 106–113.
31. Хайдаров З., Йулдашев Х.Т. Новый фотографический эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом // Прикладная физика, 2017, № 1, ст. 65-69.
32. Хайдаров З., Хайдарова К.З., Йулдашев Х.Т. Высокочувствительная полупроводниковая ионизационная фотографическая камера для инфракрасного диапазона // Прикладная физика, 2017, № 5, ст. 75-80.
33. Йулдашев Х.Т., Хайдаров З., Касымов Ш.С. Кинетика пробоя в системе «Полупроводник – газоразрядной промежуток» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4. Физика. Химия 2017, Т4, №1, ст. 16-22.