

УДК 621.315.592:621.382:621.385

## Новый фотографический эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом

З. Хайдаров, Х. Т. Йулдашев

*Экспериментально исследованы физические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Показано, что основным механизмом формирования изображения в полупроводниковой ионизационной камере является автоэлектронная эмиссия. Обнаруженный новый положительный эффект в виде нормального изменения фототока и аномального изменения темнового тока обеспечивает разрешающую способность фотографического процесса в сверхтонкой газоразрядной ячейке ( $d = 20$  мкм) полупроводниковой ионизационной камеры.*

PACS: 52.80-s

*Ключевые слова:* приборы ночного видения, фоторегистрация, пространственно-временная диагностика, полупроводниковая ионизационная камера, инфракрасное излучение, фотоприемник, фотопроводимость, электронно-оптический преобразователь, фотографический гистерезис, кремний, платина, температурные зависимости темнового и фототоков.

### Введение

Газоразрядная ячейка с плоским полупроводниковым электродом нашла достаточно широкое применение в области фотоэлектроники при регистрации оптического и инфракрасного излучения [1]. С уменьшением газового зазора газоразрядной ячейки в полупроводниковой фотографической ионизационной камере (ПФИК) существенно расширяется область пространственной стабилизации тока как по диапазону давлений газа, так и по значениям допустимых приложенных напряжений [2].

В последнее время расширяется круг используемых полупроводниковых материалов в ПФИК [3]. Полная картина процессов в газоразрядной ячейке при малых зазорах не может быть удовлетворительно интерпретирована в рамках простой теории газового разряда [4, 5]. Условия возникновения разряда в этих зазорах достаточно не изучены.

Впервые идеи по созданию полупроводниковой фотографической системы для регистрации инфракрасного излучения с управляемым электронным затвором и полупроводниковым электродом предложил С.М. Рывкин в 1970 году [6]. В 1972 году эту идею решили применить для ПФИК с газоразрядным зазором. Естественно было бы думать, что длина газоразрядной ячейки должна быть намного больше длины свободного пробега заряженных частиц. При сечениях упругого столкновения электронов с большинством атомов и молекул  $10^{-15}—10^{-16}$  см<sup>2</sup> [4] длина свободного пробега электрона при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 273 К составит 2800—280 мкм, а для ионов будет в несколько раз меньше.

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 с полупроводниковым электродом за пределами вышеуказанных условий [7]. Однако до сих пор нет удовлетворительного объяснения для механизма происходящих физических процессов в сверхтонкой газоразрядной ячейке. В настоящей работе приводятся результаты исследования, которые объясняют механизмы происходящих процессов в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом и зазором от 5 до 20 мкм.

---

Хайдаров Зокиржон, доцент.

Йулдашев Хуршиджон Толибович, старший научный сотрудник.

Ферганский политехнический институт.

Узбекистан, 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, 86.

Тел.: (+99898) 576-09-94, (+99890) 588-16-79.

E-mail: zokir\_nursuh@mail.ru; hurshid5704@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 июня 2016 г.

---

© Хайдаров З., Йулдашев Х. Т., 2016

### Экспериментальная установка и методы исследования

Для проведения экспериментов сконструировали специальную ПФИК, внешний вид которой показана на рис. 1. Исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились с электродом 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 волоконнооптической шайбы с проводящим прозрачным покрытием, диэлектрической пластиной из слюды, имеющей в центре круглое сквозное отверстие.

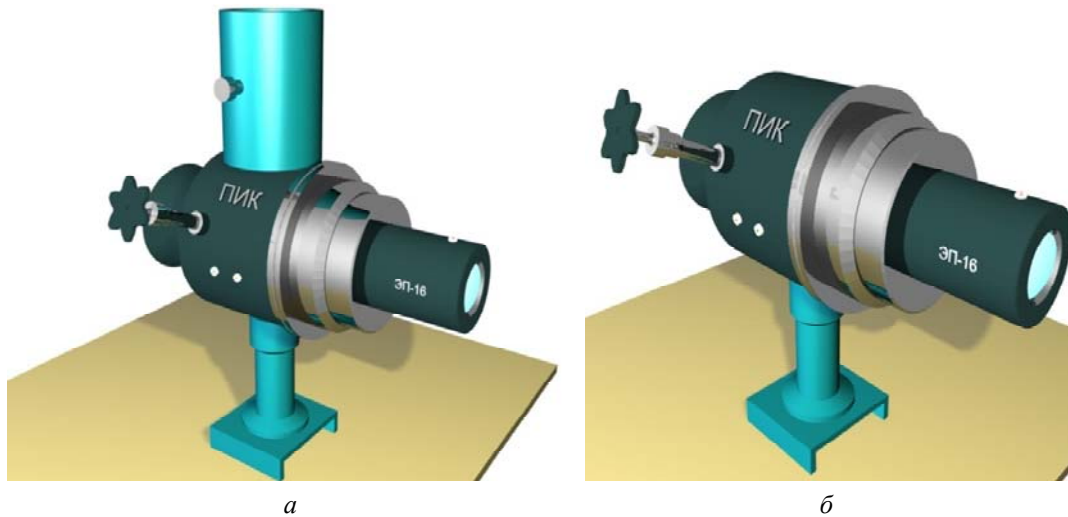


Рис. 1. Полупроводниковая ионизационная камера: а — с охлаждением жидким азотом; б — термоэлектрическим охладителем.

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, изготовленной 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 охлаждаемом варианте камеры. Фотоприемник из Si<Pt> был охлажден до температуры жидкого азота, затем температура медленно поднималась.

При этом регистрировались фототок и темновой ток газоразрядной ячейки при остаточном давлении газа (воздуха) 0,2 атм., при напряжении между фотоприемником и контрэлектродом 1200 В и интенсивность освещения  $10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> в области длин волн  $\lambda = 2,4$  мкм.

### Результаты исследования

На рис. 2 приведены ВАХ газоразрядной ячейки при толщине газоразрядного зазора  $d = 10$  мкм в темноте (кривая 1) и при освещении

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

На рис. 4 приведены температурные зависимости темнового тока и фототока, откуда видно, что, в основном, они повторяют полученные нами результаты предыдущей работы [1]. Однако в области низких температур ( $T = 85 \div 105$  К) имеет место скачкообразное изменения токов, причем зависимость фототока является нормальной, а темнового тока — аномальной.

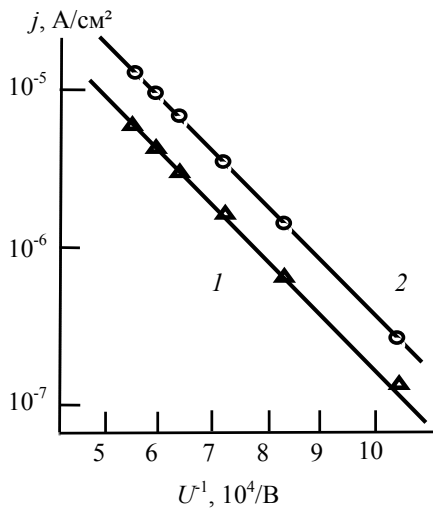


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии с GaAs: 1 — в темноте, 2 — при освещении.

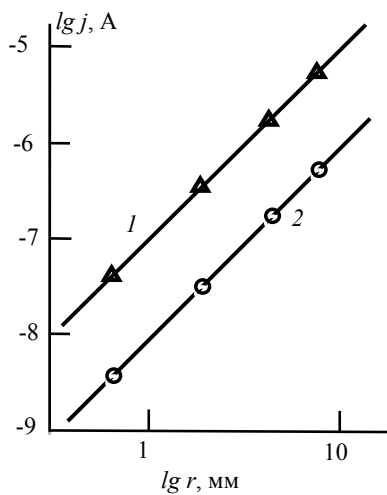


Рис. 3. Зависимость автоэлектронного тока от радиуса отверстия в диэлектрической прослойке. V, кВ: 1 — 1,5; 2 — 1.

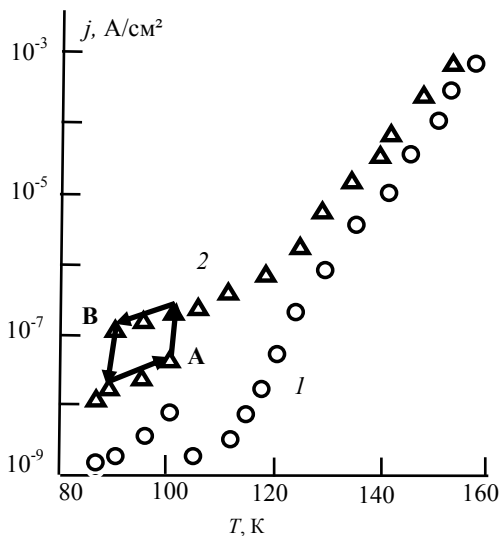


Рис. 4. Температурные зависимости темнового (кривая 1) и фототоков (кривая 2) в ПФИК с фотоприемником из Si<math>\langle Pt \rangle</math>.

На рис. 5 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 изображения, а кривая 2 — фотографической регистрации усиленного инфракрасного изображения с экрана ЭП-16.

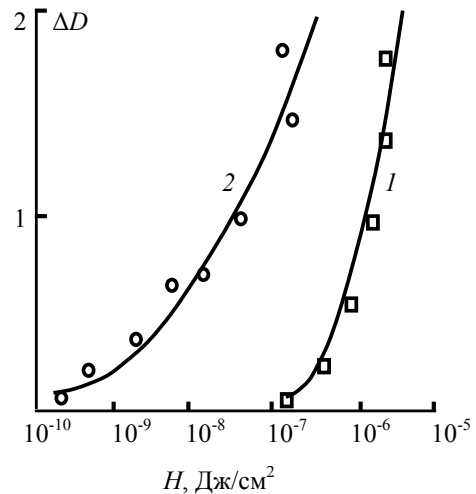


Рис. 5. Характеристическая кривая (абсолютной величины оптической плотности изображения от экспозиции) фотографического процесса в ПФИК для спектрального диапазона длин волн  $\lambda = 2,6\div 4,2$  мкм: 1 — без усиления инфракрасного изображения,  $J = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 — усиленное инфракрасное изображение с помощью ЭП-16,  $J = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Рабочая температура  $T = 110$  К.

### Обсуждение результатов

На приведенных на рис. 2 вольтамперных зависимостях экспериментальные точки удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями. Это свидетельствует о выполнении функциональной зависимости для автоэлектронного тока, определяемой известной формулой Фаулера-Нордхейма [9], модифицированной [10] с учетом эффекта Шоттки,

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

где  $j$  — плотность тока в А/см<sup>2</sup>,  $E$  — напряженность поля в В/см,  $\phi$  — 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, но 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 К темновой ток скачкообразно падает (см. рис. 4). 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  $\sim 100$  К имеет скачок вверх, это наблюдается при повышении температуры по пути *A*. При снижении температуры по пути *B*, т.е. при охлаждении системы, фототок в области температур  $\sim 90$  К скачком падает. Таким образом, в сверхтонкой газоразрядной ячейке с фотозлектродом из кремния, легированного платиной ( $\text{Si} < \text{Pt} >$ ) при неравновесных процессах наблюдается **фотоэлектрический гистерезис**, связанный с автоэлектронной эмиссией.

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

Необходимо отметить, что подобное явление в неохлаждаемом варианте (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 напряжения, достаточного для пробоя газового зазора, сначала развивается таунсендовский разряд и затем мгновенно начинается тлеющий разряд. Поэтому вышеуказанный эффект не наблюдается.

Как следует из приведенных характеристических кривых (рис. 5), фотографическая чувствительность определяется величиной порядка  $(0,4 \div 0,5) \times 10^7$  см<sup>2</sup>/Дж без усиления, а с усилением на ЭОП это величина составляет  $(0,4 \div 0,5) \times 10^{10}$  см<sup>2</sup>/Дж. Для вышеуказанного спектрального диапазона длин волн достигнутая фотографическая чувствительность является достаточно высокой. Заметим, что при этом на экране ЭП-16 визуально наблюдается достаточно четкое изображение.

Разработанная усовершенствованная ионизационная камера позволяет достичь повышения фотографической чувствительности до  $5 \times 10^9$  см<sup>2</sup>/Дж

и снижения регистрируемой мощности подающего на фотоприемник излучения до  $2 \times 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>. Данная камера (см. 1, *a*) уменьшает расход хладагента — жидкого азота — до 3 литров при 6-часовой ее эксплуатации. Заметим, что проведенные в последние десятилетия исследования показывают, что возможности ПФИК далеко не исчерпаны.

Нами были проведены также ряд исследований в ПФИК, результаты которых привели к созданию нового типа камеры, а именно, ПФИК, которая остается работоспособной при температуре термоэлектрического охладителя (рис. 1, *b*) в далекой инфракрасной области спектра. В этой камере сосуд Дьюара расположен в теле ПФИК, внутри которого пропущена трубка для сверхтекучего гелия, а выход ЭП-16 состыкуется с входом волоконнооптического жгута видеоконтрольного устройства типа EMJEON PRO (производство Кореи). Фотоприемники из кремния, легированной серой [5], в этой камере обеспечивает расширение спектрального диапазона длин волн до 11 мкм.

До этого момента в ПФИК невозможно была эксплуатация полупроводников на основе тройных соединений для длинноволновых областей спектра по причине относительно малых удельных сопротивлений фотоприемников. Предварительные исследования показывают, что использование монокристаллического  $\text{Ng}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  в ПФИК при ином расположении фотоприемников, чем ранее, охватывает камерой инфракрасную область  $\lambda = 0,8 \div 30$  мкм. Теперь использование нанокристаллов с фотопроводимостью в ПФИК делает ее вполне современной системой.

Использование кристаллов, полученных на основе нанотехнологий, также расширяет спектральный диапазон в сторону рентгеновских и гамма-излучений.

Все это открывает перспективы создания приборов ночного видения и пространственно-временного диагностического комплекса для исследования ИК-излучений объектов в дальней области длин волн, а также позволяет реализацию компактных устройств для обнаружения дефектов и неоднородностей в твердых и жидких веществах на базе систем ПФИК.

### Заключение

В работе экспериментально исследованы физические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Показано, что основным механизмом формирования изображения в полупроводниковой ионизационной камере

ре является автоэлектронная эмиссия. Обнаруженный новый положительный эффект в виде нормального изменения фототока и аномального изменения темнового тока обеспечивает разрешающую способность фотографического процесса в сверхтонкой газоразрядной ячейке ( $d = 20$  мкм) полупроводниковой ионизационной камеры.

Показано, что наличие автоэлектронной эмиссии оказывает положительное воздействие на пространственную стабилизацию газового разряда. Электроны, вырывающиеся полем из фотокатода, не только обеспечивают условия развития таунсендовского или тлеющего разрядов, но и приводят к интенсивной нейтрализации объемного заряда положительных ионов в разрядном промежутке, и тем самым отдалают условия искажения распределения электрического поля в газоразрядной ячейке. 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, т.е. интенсивностью излучения, при этом изображение объекта получается отчетливым и контрастным. Другими словами, результаты фотографирования объектов при инфракрас-

ном излучении с помощью полупроводниковой фотографической ионизационной камеры (ПФИК) всегда надёжны и просты.

Представленные результаты открывают перспективы создания приборов ночного видения и пространственно-временного диагностического комплекса для исследования ИК-излучений объектов в дальней области длин волн, а также позволяет реализацию компактных устройств для обнаружения дефектов и неоднородностей в твердых и жидких веществах на базе систем ПФИК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З.* // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 94.
2. *Хайдаров З.* // ФИП. 2006. Т. 3. № 1-2. С. 207.
3. *Хайдаров З.* // ФИП. 2011. Т. 9. № 4. С. 385.
4. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009.
5. *Ховатсон А. М.* Введение в теорию газового разряда. — Нью-Йорк (1976).
6. *Парицкий Л. Г., Рывкин С. М.* // ФТП. 1970. Т. 4. С. 645.
7. *Касымов Ш. С., Хайдаров З., Йулдашев Х. Т.* // Узбекский физический журнал. 2012. № 4. С. 241.
8. *Хайдаров З.* Авторское свидетельство России № 1672879 от 22.04.1991.
9. *Fowler R. N., Nordheim L. W.* // Procs. Roy. Soc., 1928. Vol. A119. P. 175.
10. *Nordheim L. W.* // Procs. Roy. Cos. 1928. Vol. A181. P. 626.

## A new positive photographic effect in the superthin gas discharge cell with a semiconductor electrode

*Z. Khaidarov and Kh. T. Yuldashev*

Fergana Polytechnic Institute  
86 Fergana str., 150107, Fergana, Uzbekistan  
E-mail: zokir\_nursuh@mail.ru; hurshid5704@mail.ru

*Received June 27, 2016*

*Consideration is given to results of experimental researches of the physical processes in a superthin gas discharge cell with semiconductor electrode. It is confirmed that the main mechanism of the formation of the image in a semiconductor ionization camera is auto electron emission. Within the framework of this work, it is obtained that the discovered new positive effect (in the manner of normal change of photocurrent and anomalous change of obscure dark current) provides the allowing ability of photographic process in semiconductor ionization camera with the superthin gas discharged cell.*

PACS: 52.80-s

*Keywords:* night vision devices, photographic recording, space-time diagnostics, semiconductor ionization chamber, infrared photodetector photoconductivity optoelectronic transducer photographic hysteresis, new positive effect, silicon, platinum, temperature dependence of photocurrent and dark, know-how.

#### REFERENCES

1. X. T. Yuldashev, Sh. S. Kasymov and Z. Khaidarov, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 94 (2016).
2. Z. Khaidarov, *FIP* **3** (2), 207 (2006).
3. Z. Haydarov, *FIP* **9** (4), 345 (2011).
4. Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 1991).
5. A. M. Howatson, *Introduction to Gas Discharges* (Pergamon Press Ltd., New York, 1976).
6. L. G. Paritskii and S. M. Ryvkin, *Semiconductors*, **4**, 645 (1970).
7. Sh. S. Kasymov, Z. Khaydarov and Kh. T. Yuldashev, *Usbekskii Zhurnal Fiziki* **14** (2), 241 (2012).
8. Z. Khaydarov, RF Patent No. 1672879, April 22, 1991.
9. R. N. Fowler and L. W. Nordheim, *Procs. Roy. Soc.*, **A119**, 175 (1928).
10. L. W. Nordheim, *Procs. Roy. Soc.*, **A181**, 626 (1928).