

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕРХТОНКОМ (3–20 мкм) ЗАЗОРЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

**З. Хайдаров, Х. Т. Юлдашев, Б. З. Хайдаров, С. Урмонов**

*Ферганский политехнический институт,  
Фергана, Узбекистан*

Поступила в редакцию 27.03.2015

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований изучения физических процессов в чрезмерно тонкой (3–20 мкм) газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Экспериментально подтверждается, что основным механизмом формирования изображения в полупроводниковой ионизационной камере является автоэлектронная эмиссия.

**Ключевые слова:** автоэлектронная эмиссия, газовый разряд, газоразрядная ячейка, фотоприемник, вольтамперная характеристика, несамостоятельный разряд таунсенда, лавина таунсенда, фотоспротивление полупроводника, скачкообразное уменьшение темного тока, скачкообразное увеличение фототока.

## ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА В НАДТОНКОМУ (3–20 мкм) ЗАЗОРІ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ

**З. Хайдаров, Х. Т. Юлдашев, Б. З. Хайдаров, С. Урмонов**

У даній роботі наводяться результати експериментальних досліджень фізичних процесів у надмірно тонкою (3–20 мкм) газорозрядної осередку з напівпровідниковим електродом. Експериментально підтверджується, що основним механізмом формування зображення в напівпровідниковій іонізаційній камері є автоелектронна емісія.

**Ключові слова:** автоелектронна емісія, газовий розряд, газорозрядна осередок, фотоприймач, вольтамперная характеристика, несамостійний розряд Таунсенда, лавина Таунсенда, фотоспротивление напівпровідника, стрибкоподібне зменшення темного струму, стрибкоподібне збільшення фотоструму.

## PHOTOELECTRIC PHENOMENA IN ULTRATHIN (3–20 μm) OF THE GAP GAS DISCHARGE WITH A SEMICONDUCTOR ELECTRODE

**Z. Khaidarov, Kh. T. Iuldashev, B. Z. Khaidarov, S. Urmonov**

The results of experimental researches of the physical processes in excessively thin gas-discharged cell with semiconductor electrode are given in this work. It is confirmed that the main mechanism of the formation of the image in semiconductor ionization camera is auto electron emission.

**Keywords:** field emission, gas discharge, the discharge cell, a photodetector, current-voltage characteristic, non-self-discharge Townsend, Townsend avalanche, photoresistor semiconductor, an abrupt decrease in dark current, an abrupt increase in the photocurrent.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1], посвященной изучению устойчивости горения разряда в ячейке с полупроводниковым электродом мы убедились в том, что при сверхтонких газоразрядных зазорах область устойчивости свечения разряда системы максимальна, как по диапазону давлений газа, так и по величинам допустимых приложенных напряжений. Полную картину происходящих в газоразрядной ячейке процессов при сверхтонких газоразрядных зазорах невозможно объяснить в рамках классической теории

газового разряда и тем более в рамках классической теории Таундсенда [2, 3]. Здесь необходимо привлечение новых фактов к особенностям эмиссионных явлений на реальной поверхности полупроводникового электрода. Было установлено многочисленными экспериментами, что уменьшение длины газоразрядного промежутка в газоразрядной ячейке полупроводниковой фотографической ионизационной камеры существенно влияет на визуализацию ИК изображений, какой является разрешающая способность системы, основанной на использовании

газоразрядной ячейки с полупроводниковым фоточувствительным электродом и на светотдачу разряда, определяющую его чувствительность. [4, 5].

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения ВАХ производились в конфигурации элементов, состоящей из пластины монокристаллического полупроводника из арсенида галлия с напыленным омическим контактом. Внутренняя поверхность полупроводника была отделена от плоского медного контрэлектрода с диэлектрическим покрытием из слюды или тонкого слоя лака, имеющего в центре круглое отверстие. Меняя толщину диэлектрического слоя можно было изменять толщину газоразрядного промежутка. Между электродом полупроводника и контрэлектродом прикладывалось постоянное напряжение. Были предприняты специальные меры по устранению шунтирующих утечек по поверхности изолирующих элементов конструкции. Для этого специальная камера изготавливалась из полистирола.

Исследования вольт-амперных зависимостей (ВАХ) проводились в конфигурации элементов, состоящих из пластины монокристаллического GaAs с удельным сопротивлением  $10^7$  Ом·см с напыленным металлическим прозрачным электродом. Внутренняя поверхность полупроводника была отделена от плоского латунного электрода диэлектрическим покрытием из пластины слюды или тонкого слоя лака, имеющего в центре круглое сквозное отверстие. Изменяя толщину диэлектрического слоя, можно было изменять величину межэлектродного зазора воздушного промежутка в пределах от 3 до 20 мкм. Следует отметить, что даже при тщательной обработке соприкасающихся поверхностей между ними остается зазор порядка одного микрона [6], поэтому экспериментальное исследование системы с разрядным зазором менее 2–3 мкм оказывается практически неконтролируемым. Особое внимание было обращено на, возможно, более полное устранение токов утечки, для чего разрядная ячейка помещалась в специально изготовленную камеру из полистирола. Откачка воздуха из камеры проводилась на вакуумной установке ВУП-4 и обеспечивала остаточное давление до  $10^{-5}$  Торр.

Используемые полупроводниковые пластины выбирались из числа обычно работающих в полупроводниковых преобразовательных системах ионизационного типа; их поверхность после шлифовки и механической полировки не проходила стадий химического травления, т. е. имела значительный нарушенный поверхностный слой материала полупроводника, обеспечивающий в ионизационной системе высокую скорость поверхностной рекомбинации неравновесных носителей тока в полупроводнике.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Общий вид газоразрядной ячейки приведен на рис. 1. Диапазон величин зазора удалось изменять в пределах от 3 до 20 мкм.

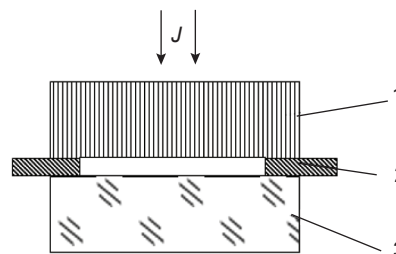


Рис. 1. Общий вид газоразрядной ячейки. 1 — полупроводниковый фотоприемник, 2 — газоразрядный промежуток, изготовленный из слюды, 3 — волоконно-оптическая шайба

Вольт-амперные характеристики при разных толщинах разрядного зазора приведены на рис. 2, на котором кривые 1–5 соответствуют ВАХ системы при толщинах воздушного зазора соответственно 3, 5, 8, 10, 20 мкм, а кривая 6 представляет ВАХ фотоприемной пластины при замене газоразрядного зазора на металлический контакт в виде напыленного никелевого слоя.

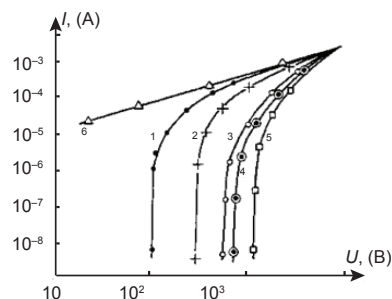


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики при разных толщинах газового промежутка  $d$  (1–5) и ВАХ полупроводника (6).  $d$ , мкм: 1 — 3, 2 — 5, 3 — 8, 4 — 10, 5 — 20 мкм

Из хода кривых следует, что до определенного напряжения газовый промежуток остается непроводящим, и только при достижении критического значения напряжения  $V_n$  ток резко возрастает. Дальнейшее нарастание тока ограничивается сопротивлением полупроводникового электрода, т. е. происходит перераспределение напряжения в системе между зазором и полупроводником. Если до пробоя, т. е. в начальной стадии практически все напряжение сосредоточено на зазоре, поскольку его сопротивление значительно превосходит сопротивление полупроводника, то после пробоя, при протекании тока напряжение на зазоре уменьшается. Такая картина изменения ВАХ с ростом величины зазора наблюдается практически всегда, начиная с плотностей тока порядка  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>, однако при меньших токах имеет место более плавное нарастание, характерное для переходной области от несамостоятельного к самостоятельному газовому разряду. В случае сверхтонких зазоров вероятность актов ударной ионизации на пути движения электрона возрастает, и перенос зарядов через зазор становится достаточно эффективным.

На рис. 3 приведены ВАХ ячейки при этих условиях при толщине зазора  $d=10$  мкм в темноте (кривая 1) и при освещении полупроводника (кривая 2).

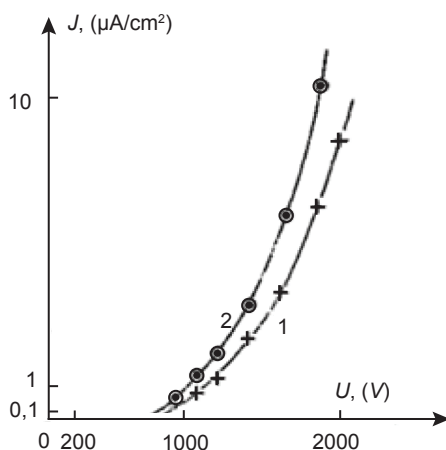


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии с арсенида галлия: 1 — в темноте, 2 — при освещении

Очевидно, что природа тока здесь может быть связана либо с автоэлектронной эмиссией, либо с утечкой по поверхности диэлектрического зазора в сильном электрическом поле по

периметру отверстия, ограничивающего вакуумный зазор, т. е. за счет краевого эффекта. Для разрешения этой альтернативы были проведены измерения ВАХ при нескольких значениях диаметра сквозного отверстия в диэлектрике. При этом предполагалось, что при преобладающем токе утечки величина общего тока с ростом диаметра будет возрастать линейно (соответственно увеличению длины окружности), а при преобладании автоэлектронной эмиссии — квадратично (соответственно увеличению площади отверстия). На рис. 4 приведены результаты измерений, из которых однозначно следует, что ток возрастает пропорционально площади поперечного сечения и краевая утечка не вносит существенного вклада.

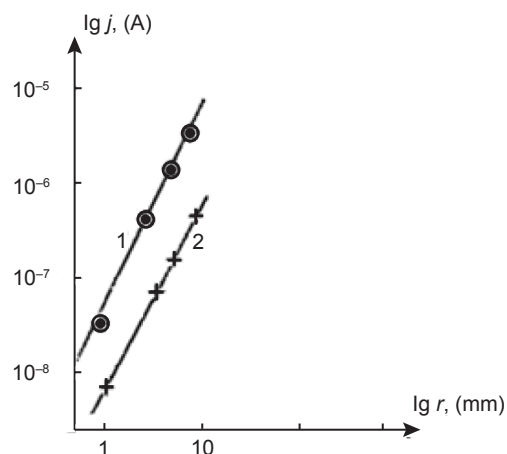


Рис. 4. Зависимость автоэмиссионного тока от радиуса отверстия в диэлектрической прослойке  $V$ , кВ: 1–1, 5, 2–1

На рис. 5 приведены вольт-амперные зависимости, построенные в масштабе  $lg j (I/V)$ .

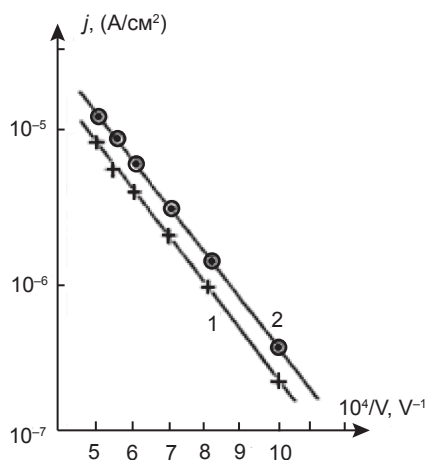


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии с арсенида галлия: 1 — в темноте, 2 — при освещении

Экспериментальные точки удовлетворительно располагаются по прямым, что свидетельствует о выполнении функциональной зависимости для автоэлектронного тока, определяемой известной формулой Фаулера-Нордгейма [6], модифицированной Нордгеймом с учетом эффекта Шоттки,

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

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 Нордгейма и  $y = 3,62 \cdot 10^{-4} E^{1/2} / \phi$ .

Оценка величины тока автоэлектронной эмиссии из арсенида галлия при следующих параметрах:  $\phi = 4,7$  эВ,  $E = 1,5 \cdot 10^7$  В/см дает значение  $j = 3,7 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>, причем  $f(y) = 0,86$  по таблице. Сравнение величины автоэмиссионного тока, полученного в экспериментах и из формулы (1), показывает, что наблюдаемые токи значительно больше расчетных значений. Причины расхождения в значениях токов относятся к различию в условиях эксперимента. Приводимая формула относится к случаю высокого вакуума к тщательно обезгаженной и совершенной поверхности кристалла. Из литературы известно, что несовершенство поверхности, наличие микронеоднородностей, оксидных слоев и адсорбированных молекул приводят к существенному возрастанию величины автоэмиссионного тока при сохранении в целом теоретической функциональной зависимости. Так, по данным, при измерениях на неровных, насыщенных газом поверхностях токи автоэлектронной эмиссии наблюдались даже в полях порядка  $10^4$  В/см.

Таким образом, в реальных условиях эксперимента имеет место достаточно сильная автоэлектронная эмиссия с поверхности полупроводника, которая при газовом заполнении может играть роль поставщика электронов для лавин Таунсенда в газовом разряде, а также быть основным механизмом прохождения тока при очень малых зазорах, когда размножение носителей затруднено. Отметим, что наблюдаемый автоэлектронный ток контролируется сопротивлением полупроводника.

Напряжение пробоя линейно возрастает с увеличением толщины зазора, как это следует из рис. 6, причем экстраполяция дает нулевое значение  $V_{gl}$  при нулевом значении  $d$ .

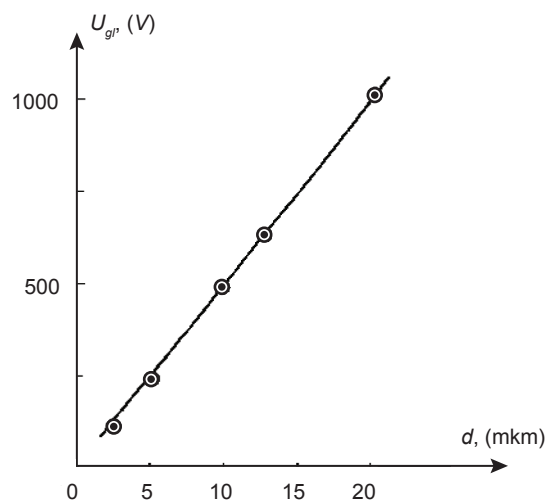


Рис. 6. Зависимость пробивного напряжения от толщины газового промежутка

Рассмотрим особенности характера разряда в случае достаточно сильной автоэлектронной эмиссии, реализуемой в наших условиях. Будем считать, что начальный ток  $i_0 = i_1$ , определяемый внешней ионизацией, включает адитивно и составляющую, характеризующую автоэмиссионный ток  $j_A$ , т. е.  $i_0 = j_1 + j_A$ . Повторяя все выкладки теории в предположении, что  $j_1$  все время остается меньшим  $j_A$ , получаем следующее упрощенное выражение для полного тока разряда

$$j = (j_A + j_1) \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент объемной ионизации,  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий  $\gamma$ -процессы на катоде. Экспоненциальный множитель в формуле (2) можно рассматривать как коэффициент газоразрядного усиления. В данном приближении он постоянен и не зависит от величины начального тока. Полученное приближенное соотношение может быть аппроксимировано за пределы малости автоэмиссионного тока по сравнению с током обусловленным объемными ионизаторами, по крайней мере, до пределов,



когда влиянием объемных зарядов можно пренебречь. Тогда следует считать, что возможна ситуация, когда существенное образование лавин ударной ионизации затруднено из-за малости разрядного зазора, протекает значительный по величине ток в основном автоэлектронной эмиссии с газовым усилением, обуславливающий достаточно интенсивное свечение разряда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наличие автоэлектронной эмиссии оказывает положительное воздействие на пространственную стабилизацию газового разряда. Поток электронов, вырываемых полем из катода, приводит к интенсивной нейтрализации объемного заряда положительных ионов в разрядном промежутке, и тем самым отдаляет условия такого искажения распределения электрического поля в зазоре, которое соответствует переходу от таунсендовского к тлеющему разряду, сопровождающемуся срывом стабильного горения разряда. Экспериментальными данными, полученными при малой величине разрядных промежутков это подтверждается. Автоэлектронная эмиссия при газовом заполнении играет роль поставщика электронов для лавин таунсенда в газовом разряде. При использованной обработке поверхности, характеризующейся наличием значительного нарушенного слоя на контакте полупроводника с газовой плазмой, разряд становится относительно мало чувствительным к локальным свойствам поверхности полупроводника при сохранении значительного авто- эмиссионного тока, что определяет большую равномерность распределения плотности тока и свечения разряда по площади полупроводникового электрода. Отметим, что наблюдаемый автоэлектронный ток контролируется фотосоппротивлением полупроводника, то есть интенсивностью излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдаров З. Особенности автоэлектронной эмиссии в сверхтонком зазоре газоразрядной ячейки в полупроводниковой ионизационной камере // Физическая инженерия поверхности. — 2006. — Т. 4, № 1, 2. — С. 205–209.
2. Парицкий Л. Г. «Полупроводниковые фотографические процессы», глава 4 в монографии «Несеребрянные фотографические процессы» / Под ред. А. Л. Кортужанского. — Ленинград: «Химия» Ленинградское отделение, 1984.
3. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. — М. (1950).
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М. (1987).
5. Ховатсон А. М. Введение в теорию газового разряда. — М. (1980).
6. Астров А. Ю., Касымов Ш. С., Парицкий Л. Г., Рывкин С. М. Исследование характеристик полупроводникового ионизационного преобразователя изображений // ФТП. — 1975. — Т. 9, вып. 12. — 1844 с.

## LITERATURA

1. Hajdarov Z. Osobennosti avtoelektronnoj emissii v sverhtonkom zazore gazorazryadnoj yachejki v poluprovodnikovoj ionizacionnoj kamere // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2006. Vol. 4, No. 1, 2. — P. 205–209.
2. Parickij L. G. «Poluprovodnikovye fotograficheskie processy», glava 4 v monografii «Neserebryannie fotograficheskie processy» / Pod red. A. L. Kortuzhanskogo. — Leningrad: «Himiya» Leningradskoe otdelenie, 1984.
3. Kapcov N. A. Elektricheskie yavleniya v gazah i vakuume. — M. (1950).
4. Rajzer Yu. P. Fizika gazovogo razryada. — M. (1987).
5. Hovatson A. M. Vvedenie v teoriyu gazovogo razryada. — M. (1980).
6. Astrov A. Yu., Kasymov Sh. S., Parickij L. G., Ryvkin S. M. Issledovanie harakteristik poluprovodnikovogo ionizacionnogo preobrazovatelya izobrazhenij // FTP. — 1975. — Vol. 9, vyp. 12. — 1844 p.