

УДК 621.383.8: 621.315.592

## Фотопреобразователь ИК-изображений со сверхтонкой газоразрядной ячейкой и люминафором

Х. Т. Йулдашев, Ш. С. Касымов, З. Хайдаров

*Приведены экспериментальные результаты исследования зависимости интенсивности свечения газа и люминесцентного экрана от величины тока при различных значениях газоразрядного промежутка ( $d = 10\text{—}100$  мкм) и давления газа ( $P = 5\text{—}120$  Торр) фотопреобразователя ионизационного типа с полупроводниковым  $GaAs$ -электродом. При измерениях считывание выходного сигнала производилось с помощью фотоэлектрического множителя ФЭУ-19А.*

PACS: 52.80.-s

*Ключевые слова:* преобразователь изображений, фотоэлектрическая, преобразовательная и выходная характеристики, люминесцентный экран, фотоэлектронный множитель, кремниевый фильтр.

### Введение

В оптоэлектронике и фотопреобразовательной технике расширяются исследования фотоэлектрических свойств газоразрядных систем с полупроводниковым электродом (т. н. SGD-структуры) при малых межэлектродных расстояниях  $d \leq 0,1$  мм [1—4]. Такие устройства нашли практическое применение в высокоскоростных преобразователях инфракрасных (ИК) изображений ионизационного типа, в частности, для пространственно-временной диагностики лазерных ИК-излучений [5, 6]. При этом пространственное распределение плотности тока в тонком газоразрядном промежутке контролируется полупроводниковым фотоприемником, чувствительного к ИК-излучению.

Для получения стационарного объемного разряда в таких устройствах важную роль играют (наряду с параметрами высокоомного полупроводникового электрода) также и значения газового зазора  $d$ , и давления газа  $P$ . Так, например, с уменьшением  $d$  расширяется область пространственной стабилизации тока и фотоэлектрического усиления SGD-структуры как по диапазону давлений газа, так и по значениям допустимых приложенных напряжений [7, 8].

Авторами работы [7] экспериментально исследована диаграмма стабильного горения разряда в виде зависимости напряжения зажигания  $U_{gl}$  и напряжения срыва  $U_{ed}$  от давления воздуха  $P$  (50—700 Торр) при заданной величине газового зазора от 10 мкм до 5 мм. Показано, что срыв стабильности связан с образованием объемного заряда положительных ионов в разрядном промежутке, определяющем переход от таунсендовского к тлеющему разряду.

В работе [8] приводятся результаты экспериментальных исследований изучения физических процессов в чрезмерно тонкой  $d < 20$  мкм газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Установлено, что достаточно сильная автоэлектронная эмиссия с поверхности полупроводника играет роль поставщика электронов для лавин Таунсенда в газовом разряде и является основным механизмом прохождения тока при очень малых зазорах.

В работе [9] представлены результаты исследования физического механизма стабилизации газового разряда высокоомным электродом. Установлено, что влияние полупроводникового электрода на распределение стационарного тока в газоразрядном зазоре связано с проводимостью его приповерхностного слоя, а объемное сопротивление полупроводника определяет лишь сопротивление нагрузки. Экспериментально показано, что локальная металлизация поверхности полупроводника приводит к шнурованию в местах металлизации.

В работе [10] исследовалось влияние полупроводникового электрода и межэлектродного расстояния на начало процесса ионизации газа.

---

Йулдашев Хуршиджон Толибович, старший научный сотрудник.

Касымов Шавкат Сулаймонович, доцент.

Хайдаров Зокиржон, доцент.

Ферганский политехнический институт.

Узбекистан, 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, 78/14.

Тел. +99890-588-16-79. E-mail: hurshid5704@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 февраля 2016 г.

---

© Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З., 2016

Из вольт-амперных характеристик газоразрядной ячейке с узким ( $d \sim 60$  мкм) зазором и двумя типами электродов (оба электрода металлические и один из электродов — полупроводник из высокоомного ( $\rho \sim 10^8$  Ом·см) GaAs), измеренных при разных давлениях ( $P = 15 \div 760$  Торр), построены кривые Пашена. Показано, что узкий зазор с металлическими электродами имеет резкую зависимость напряжения зажигания  $U_{gl}$  в области  $pd = (2 \div 30)$  Торр·мкм, тогда как в протяженных газовых зазорах в этой области кривой Пашена напряжение зажигания слабо меняется.

Однако полная физическая картина процессов в SGD-структуре при малом газоразрядном промежутке еще далеко от ясности, особенно в части адекватных механизмов токопрохождения и стабилизации горения разряда. Все это требует дальнейших экспериментальных исследований по проблемам устойчивости тока в зависимости как от параметров разрядного промежутка ( $d, P$ ), так и от электрофизических параметров фоточувствительного полупроводника.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости интенсивности свечения газа и люминесцентного экрана от величины тока при различных значениях газоразрядного промежутка ( $d = 10\text{—}100$  мкм) и остаточного давления ( $P = 5\text{—}120$  Торр) при комнатной температуре для систем с полуизолирующим GaAs-фотоприемником.

### Экспериментальная установка и методы измерений

Принцип работы ионизационной системы позволяет построить два варианта преобразователей изображения, отличающихся способом формирования выходного сигнала. В первом случае выходное изображение формируется под действием электронно-ионной бомбардировки в тонком слое люминофора, нанесенного на прозрачную проводящую подложку со стороны разряда, а во втором изображение формируется в газоразрядном промежутке в виде свечения ионизованного газа. При этом используется тонкий прозрачный электрод без каких-либо дополнительных слоев. Следует отметить, что в первом варианте спектральная характеристика выходного сигнала определяется спектром свечения люминофора, а во втором — совпадает со спектром свечения ионизованного газа. Поэтому преобразователь изображения с люминесцентным экраном целесообразно применять, главным образом, для визуального наблюдения изображения. В этом случае легко подобрать люминофор, цвет свечения которого совпадает с длиной волны, эффективно воспринимаемой глазом.

Поскольку процессы, приводящие к формированию изображения в этих двух вариантах, обусловлены различными проявлениями газового разряда, то для получения наибольшей яркости выходного сигнала необходимо подбирать оптимальный режим работы системы, исходя из энергетического баланса расходуемой в газовом разряде электрической мощности. Если проследить на диаграммах работы [7] распределение относительных долей расходуемой мощности, построенное как функция  $E/P$  (где  $E$  — напряженность поля), то можно легко заметить, что наибольшая яркость свечения люминофора (она пропорциональна средней энергии частиц, бомбардирующих люминофор) достигается при больших значениях  $E/P$ , т. е. при малых межэлектродных расстояниях  $d$  и низких давлениях газа  $P$ , а наибольшая яркость свечения газа, при прочих равных условиях, достигается при малых  $E/P$  (т. е. больших  $d$  и  $P$ ), соответствующих увеличению относительной доли мощности, теряемой на возбуждение атомов (молекул) газа и расходуемой затем в виде лучистой энергии. Однако надо иметь в виду, что чрезмерное увеличение или уменьшение величин  $P$  и  $d$  приводит соответственно к ухудшению разрешающей способности или к прекращению разряда в газовом зазоре. В этом случае для поддержания разряда необходимо повышение рабочего напряжения, что может привести к выходу из строя фотоприемника (ФП).

Если в преобразователе изображений с использованием свечения газа важнейшие параметры (т. е. эффективность свечения и разрешающая способность) определяются только свойствами воспринимающей части и условием протекания газового разряда, то в преобразователе с люминесцентным экраном они также тесно связаны со структурой люминесцирующего слоя. Для получения высокой разрешающей способности слой, очевидно, должен иметь малую толщину, а зерна люминофора должны быть достаточно мелкими с одинаковыми размерами. В противном случае, при малых межэлектродных расстояниях геометрические неровности на поверхности экрана могут существенно влиять на характер газового разряда.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исследуемая газоразрядная система с полупроводниковым электродом включала полупроводниковый и прозрачный электроды, разделенные диэлектрической прокладкой с отверстием диаметром 15 мм, которое формирует газоразрядную область. Толщина прокладки определяет значение  $d$ , которое изменялось в наших опытах в диапазоне 10—100 мкм. Полупроводниковый электрод (полуизолирующий GaAs) диаметром 25 мм и толщиной ~1 мм одновременно служил также фотоприемником всего устройства.

На внешней стороне фотоприемника создавался полупрозрачный электрический контакт, изготовленный методом напыления в вакууме тонкой пленки металла, а именно, Ni. В качестве анода использовалась стеклянная пластина, покрытая проводящим слоем SnO<sub>2</sub> [4].

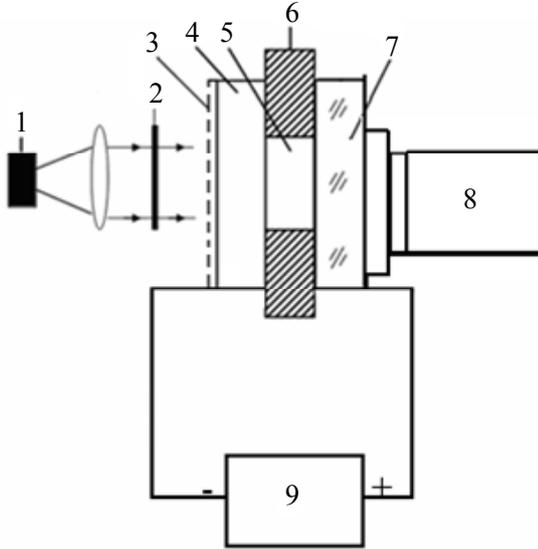


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. 1 — источник освещения, 2 — Si-фильтр, 3 — полупрозрачный контакт, 4 — полупроводниковый фотоприемник, 5 — газоразрядный промежуток, 6 — стеклянная фольга с центральным круглым отверстием, 7 — прозрачный контакт SnO<sub>2</sub>, 8 — фотоэлектронный умножитель, 9 — внешнее сопротивление, 10 — источник постоянного тока-УИП-2.

При определении интенсивности свечения ионизованного газа в качестве электрода использовалось стекло с прозрачным проводящим слоем окиси олова. В режиме работы с люминесцентным экраном на прозрачный электрод наносился люминофор. Считывание выходного сигнала производилось с помощью ФЭУ. В качестве источника света использовался осветитель типа ОИ-24.

**Результаты и их обсуждения**

На рис. 2 показаны зависимости интенсивности свечения газа (а) и свечения экрана (б) от величины тока при различных значениях газоразрядного промежутка. При этих измерениях считывание выходного сигнала свечения производилось с помощью фотоэлектрического умножителя ФЭУ-19А, т. е. в качестве меры интенсивности свечения принимался ток ФЭУ.

При  $U > U_{pr}$  свечение линейно растет с увеличением приложенного напряжения. Поэтому, как видно из рисунков, интенсивность свечения оказывается пропорциональной току системы. Во всем исследованном диапазоне токов свечение газа и люминесцентного экрана практического линейно следует за током системы. Отметим более сильную токовую зависимость свечения газа, нежели свечения люминесцентного экрана, при заданных значениях давления газа  $P = 76$  Торр, но при различных значениях толщины газоразрядного промежутка. Интенсивность освещения (освещенность) фотоприемника всегда была на уровне  $I_{осв} = 2$  мВт/см<sup>2</sup>.

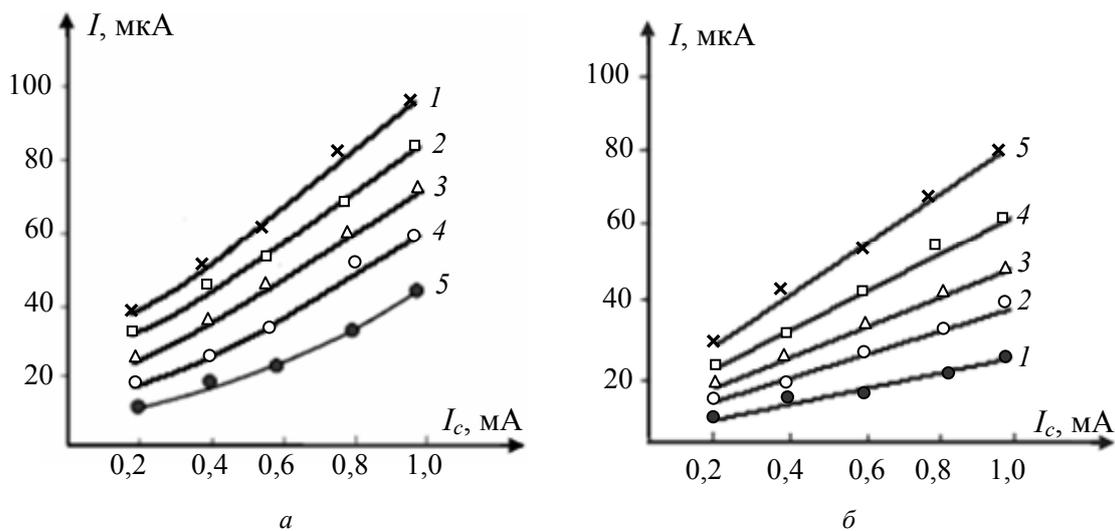


Рис. 2. Зависимость интенсивности свечения I (ток ФЭУ) для газа (а) и люминесцентного экрана (б) от силы тока ионизационной системы I<sub>c</sub> при различных значениях толщины газоразрядного промежутка. d, мкм: 1 — 30; 2 — 25; 3 — 20; 4 — 15; 5 — 10. P = 76 Торр. Освещенность ФП равна 2·10<sup>-3</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлены зависимости свечения газа (а) и люминесцентного экрана (б) от величины давления газа  $P$  для разных толщин газоразрядного промежутка. Кривые получены при значении интенсивности освещения ФП равным

$I_{осв} = 2 \text{ мВт/см}^2$  и значении тока  $I_c = 0,2 \text{ мА}$  через газоразрядный промежуток. Видно, что эффективность преобразования излучения в случае регистрации люминесцентным экраном растет при уменьшении  $d$  и  $P$  (рис. 3, б).

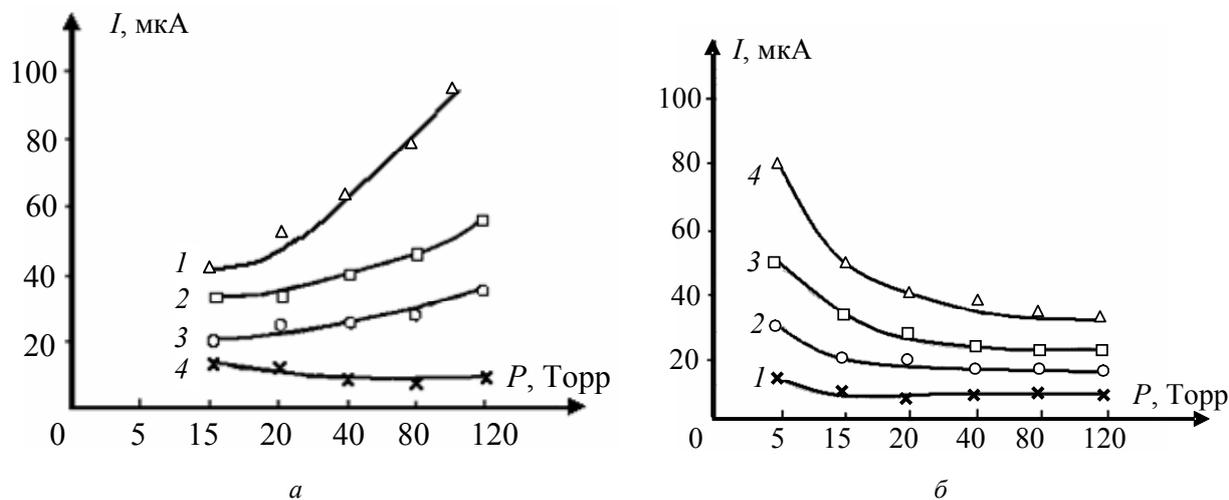


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения газа (а) и люминесцентного экрана (б) от давления остаточных паров при различных толщинах газоразрядного промежутка  $d$ , мкм: 1 — 100; 2 — 30; 3 — 20; 4 — 10.  $I_c = 0,2 \text{ мА}$ .  $I = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$ .

С уменьшением давления газа при прочих равных условиях яркость свечения люминесцентного экрана растет. Однако следует отметить, что при малых давлениях ( $P < 30 \text{ Торр}$ ) однородность свечения экрана ухудшается. По-видимому, в условиях малой плотности газа в межэлектродном пространстве возрастает влияние свойств поверхностей электродов (загрязнений, микронеровностей) на характер пробоя. В случае свечения газа, наоборот, уменьшение  $d$  и  $P$  в общем случае приводят к снижению эффективности преобразования излучения (рис. 3, а), кроме значения  $d = 10 \text{ мкм}$ , когда длина свободного пробега электрона становится больше, чем  $d$ .

Прежде чем анализировать эти результаты отметим, что в случае ФП из GaAs, работающего при комнатной температуре, на электрод подавался отрицательный потенциал. При такой полярности напряжения свечение разрядного промежутка (либо экрана) было однородным и, тем самым, достигалась максимальная разрешающая способность системы. В случае обратной полярности качество изображения ухудшалось. На фоне однородного свечения появлялись участки с повышенной плотностью тока. По-видимому, такая асимметричность работы системы обусловлена особенностями контакта поверхности полупроводникового ФП с ионизованным газом. Не останавливаясь здесь подробно на этом эффекте, отметим, что ухудшение однородности свечения может

быть в том случае, если условия на рассматриваемом контакте таковы, что в приповерхностной области полупроводника происходит значительное накопление носителей тока. Понижение приповерхностного сопротивления полупроводника может способствовать шнурованию тока в газоразрядном промежутке. Другой причиной нарушения равномерности могут быть инжекционные явления в полупроводнике.

Из приведенных экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что распределение поля в зазоре неоднородно, следовательно, неоднородно и пространственно-энергетическое распределение электронов. Вблизи люминесцентного экрана, служащего анодом, энергия электронов ниже, чем в области катодного падения потенциала. Уменьшение  $d$  при неизменном давлении газа приближает анод к области с высокой напряженностью поля и с высокой энергией электронов, что повышает эффективность возбуждения электронами люминофора и увеличивает яркость экрана.

Уменьшение остаточного давления газа при постоянной толщине газоразрядного промежутка приводит, с одной стороны, к росту средней энергии электронов (поскольку частота столкновений уменьшается), а также, с другой стороны, к расширению области катодного падения потенциала. Таким образом, уменьшение  $P$  и  $d$  при сохранении неизменной плотности тока увеличивает яркость люминесцентного экрана, что подтверждается результатами (см. рис. 3, б).

Отметим, что в случае регистрации свечения газа, вклад в это свечение дает весь разрядный объем. При этом, казалось бы, интенсивность свечения для постоянного давления газа должна быть пропорциональна мощности, выделяемой в газоразрядном промежутке, т. е. величине  $I_c \cdot U_{пр}$ . При постоянной плотности тока выходная яркость должна быть пропорциональна  $U_{пр}$ . Сравнение данных рис. 3, а с зависимостью  $U_{пр}$  от параметров зазора показывает, что кривые зависимости выходной яркости от величины давления подобны соответствующим кривым изменениям  $U_{пр}$ . Однако легко заметить, что при увеличении  $d$  интенсивность свечения возрастает быстрее, чем  $U_{пр}$ . По-видимому, это объясняется тем обстоятельством, что рост  $d$  сопровождается уменьшением потерь энергии при рекомбинации возбужденных молекул и атомов газа на стенках разрядного объема и, соответственно, увеличением вероятности излучательной рекомбинации.

### Выходные характеристики фотопреобразователя

Важными характеристиками преобразователей, определяющих их чувствительность и динамический диапазон входных интенсивностей, являются выходные характеристики (ВХ). На рис. 4, а и б показаны семейства ВХ преобразователей с люминесцентным экраном и светящимся газоразрядным промежутком для случая использования полупроводникового арсенид-галлиевого ФП. Кривые получены при фиксированном значении воздушного зазора  $d = 100$  мкм при различных напряжениях питания. Выходная яркость выражена в относительных единицах, пропорциональных току ФЭУ. При увеличении питающего напряжения ВХ сдвигаются в сторону больших интенсивностей свечения экрана и разрядного промежутка. Таким образом, коэффициент преобразования увеличивается. При этом, однако, увеличивается и «темновое» свечение (т. е. свечение экрана и ионизованного газа при отсутствии входного сигнала) за счет роста темнового тока системы при увеличении напряжения.

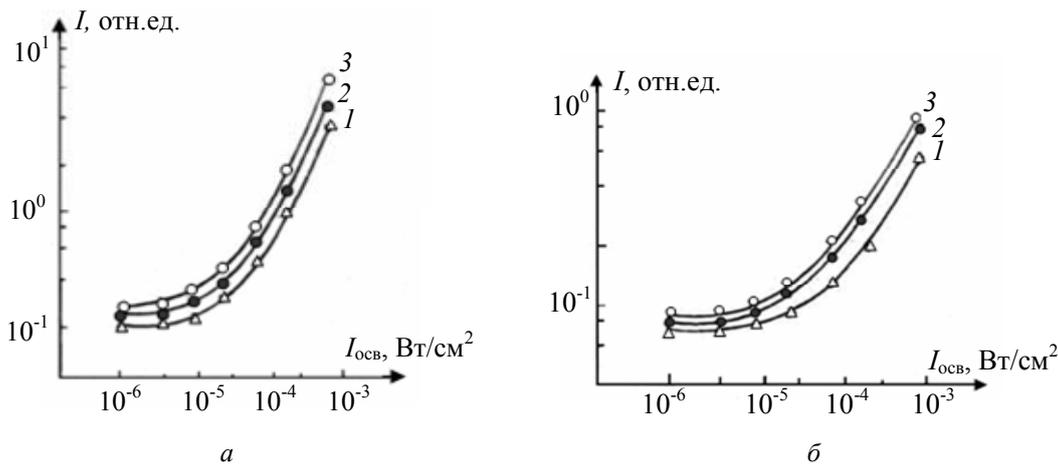


Рис. 4. Выходные характеристики преобразователя с люминесцентным экраном (а) и со светящимся разрядным промежутком (б).  $d = 100$  мкм.  $P = 76$  Торр. Напряжение на промежутке  $U$ , В: 1 — 800; 2 — 900; 3 — 1000.

Анализ полученных результатов показывает, что полупроводниковые преобразователи ИК-изображений (в видимый диапазон) ионизационного типа имеют существенные преимущества по сравнению с функционально подобными преобразователями изображений с электронным усилением (электронно-оптические преобразователи — ЭОП), электролюминесцентными преобразователями и системами с поэлементным считыванием ИК-изображений.

### Заключение

На основе фотографических систем ионизационного типа предложены и разработаны полупроводниковые преобразователи ИК-изображений в видимые картины, в которых выходной сигнал

формируется в тонком слое люминофора или же в газоразрядном промежутке в виде свечения газа. Показано, что преобразователи изображений ионизационного типа имеют существенные преимущества по сравнению с функционально подобными преобразователями изображений с электронным усилением (электронно-оптические преобразователи — ЭОП), электролюминесцентными преобразователями и системами с поэлементным считыванием ИК-изображений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lodygin A. N., Portsel L. M., Astrov Yu. A. // Technical Physics. 2008. Vol. 34. No. 7. P. 615.
2. Астров Ю. А., Шуман В. Б., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Махова А. Н. // ФТП. 2008. Т. 42. № 4. С. 457.

3. Астров Ю. А., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 2. С. 42.
4. Лодыгин А. Н., Астров Ю. А., Порцель Л. М., Березулин Е. В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 5. С. 27.
5. Туланов В. В., Сиябеков Х. Б., Давлетова А. Ш., Ортаева К. А. // ФТП. 2001. Т. 35. № 4. С. 1009.
6. Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Астров Ю. А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 14. С. 61.
7. Парицкий Л. Г., Хайдаров З., Мухамдиев О., Дадабоев О. // ФТП. 1993. Т. 27. № 11/12. С. 2009.
8. Парицкий Л. Г., Хайдаров З. // ФТП. 1993. Т. 27. № 11/12. С. 2017.
9. Орбух В. И., Лебедева Н. Н., Саламов Б. Г. // ФТП. 2009. Т. 43. № 10. С. 1329.
10. Садых-Заде Г. М., Лебедева Н. Н., Султанов Э. А., Гасанов Л. С. // Вестник Бакинского Государственного Университета. 2005. № 3. Р. 181.

## Photoconverter of IR images with a sub-micron gas-filled cell and phosphor

*Kh. T. Yuldashev, Sh. S. Kasymov, and Z. Khaidarov*

Fergana Polytechnic Institute  
78/14 Fergana str., 150107, Fergana, Uzbekistan  
E-mail: hurshid5704@mail.ru

*Received February 29, 2016*

***Consideration is given to experimental results on the gas emission and luminescent screen for a photoconverter of IR images with a sub-micron gas-filled cell and phosphor. A radiation intensity is measured at different values of discharge gap ( $d = 10\text{--}100$  microns) and gas pressure ( $P = 5\text{--}120$  Torr). The photoconverter of ionizing type was used with a semi-insulating GaAs electrode. The output signal has been produced by the photoelectric multiplier tube (FEU-19A) at measuring.***

PACS: 52.80.-s

***Keywords:*** converter, photoelectric, transformative and outside characteristics, luminescent screen, photoelectron multiplication circuit, silicic filter.

### REFERENCES

1. A. N. Lodygin, L. M. Portsel, and Yu. A. Astrov, Technical Physics 2008, **34**, 615 (2008).
2. Yu. A. Astrov, V. B. Shuman, A. N. Lodygin, L. M. Portsel, and A.N. Makhova, Semiconductors. **42**, 457 (2008).
3. Yu. A. Astrov, A. N. Lodygin, and L. M. Portsel, Technical Physics. **81** (2), 42 (2011).
4. A. N. Lodygin, Yu. A. Astrov, L. M. Portsel, and E.V. Beregulyn, Technical Physics **85** 5, 27 (2015).
5. V. V. Tulanov, X. B. Siyabekov, A. Sh. Davletova, and K.A. Ortaeva, Semiconductors. **35**, 1009 (2011).
6. A. N. Lodygin, L. M. Portsel, and Yu. A. Astrov, Technical Physics Letters **34** (14), 61 (2008).
7. L. G. Paritskiy, Z. Khaydarov, O. Muhamadiev, and O. Dadaboev, Semiconductors **27**, 2009 (1993).
8. L. G. Paritskiy and Z. Khaydarov, Semiconductors **27**, 2017 (1993).
9. V. I. Orbukh, N. N. Lebedeva, and B. G. Salamov, Semiconductors **43**, 1329 (2009).
10. Q. M. Sadykh-Zade, N. N. Lebedova, E. A. Sultanov, and L. C. Gasanov, Vestnik Baku Gos. Univer., No. 3, 181 (2005).