

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СВЕРХТОНКОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

**Х. Т. Юлдашев, Ш. С. Касымов,**

*Ферганский политехнический институт, Узбекистан,  
г. Фергана*

Поступила в редакцию 17.05.2015

Приведены экспериментальные результаты исследований фотоэлектрических, преобразовательных и выходных характеристик фотопреобразователя ионизационного типа со сверхтонкой газоразрядной ячейкой. Измерение интенсивности выходного сигнала производилось с помощью фотоэлектрического умножителя типа ФЭУ-19А, при котором для исключения попадания побочных засветок на фотоприемник освещение осуществлялось через кремниевый фильтр.

**Ключевые слова:** преобразователь изображений, полупроводниковый электрод, фотоэлектрическая, преобразовательная и выходная характеристики, ионизационная камера, люминесцентный экран, фотоэлектронный умножитель, кремниевый фильтр, газоразрядный промежуток, полуизолирующий арсенид галлия.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗОБРАЖЕНЬ В НАДТОНКИХ ГАЗОРАЗРЯДНИХ ОСЕРЕДКАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ

**Х. Т. Юлдашев, Ш. С. Касимов**

Наведено експериментальні результати досліджень фотоелектричних, перетворювальних і вихідних характеристик фотоперетворювача іонізаційного типу з надтонким газорозрядним осередком. Вимірювання інтенсивності вихідного сигналу проводилося за допомогою фотоелектричного помножувача типу ФЭУ-19А, при якому для вимкнення потрапляння побічних засвічень на фотоприймач освітлення здійснювалося через кремнієвий фільтр.

**Ключові слова:** перетворювач зображень, напівпровідниковий електрод, фотоелектрична, перетворювальна і вихідна характеристики, іонізаційна камера, люмінесцентний екран, фотоелектронний помножувач, кремнієвий фільтр, газорозрядний проміжок, напівізолюючий арсенід галію.

## THE STUDY CHARACTERISTICS OF THE CONVERTER IMAGES IN THE HYPERFINE DISCHARGE CELL A SEMICONDUCTOR ELECTRODE

**H. T. Yuldashev, S. S. Kasymov**

The experimental results of photovoltaic research converting the output characteristics photoconverter ionization type with hyperfine discharge cell. Measurement of the intensity of the output signal produced by a photoelectric multiplier type FEU-19A in which to avoid falling on the photodetector side illumination lighting was carried out through a silicon filter.

**Keywords:** image converter, a semiconductor electrode, photoelectric, of the converter, the output characteristic, the ionization chamber, the luminescent screen, photomultiplier tube, silicon filter, gas-discharge gap, semi-insulating gallium arsenide.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время расширяется интерес к исследованиям фотоэлектрических свойств газоразрядных систем с полупроводниковым электродом (SGD-структуры) при малых межэлектродных расстояниях  $d_g \leq 0,1$  мм

[1–4]. Такие устройства нашли практическое применение в высокоскоростных преобразователях инфракрасных (ИК) изображений ионизационного типа, в частности для пространственно-временной диагностики ИК лазерных излучений

[5, 6]. При этом пространственное распределение плотности тока в тонком газоразрядном промежутке контролируется полупроводниковым фотоприемником, чувствительным к ИК освещению. Для получения объемного стационарного разряда важную роль играют наряду с параметрами высокоомного полупроводникового электрода, также и значения газового зазора  $d_g$ , давления остаточного газа  $P_g$ . Так, с уменьшением  $d_g$  расширяется область пространственной стабилизации тока и фотоэлектрического усиления SGD-структуры как по диапазону давлений газа, так и по значениям допустимых приложенных напряжений [7].

Поскольку фотографические характеристики съемочных устройств в конечном итоге определяются процессами, происходящими в ионизированном газе при протекании тока, то вначале целесообразно ознакомиться с результатами экспериментального исследования влияния параметров газоразрядного промежутка на интенсивность свечения газа и люминесцентного экрана, а также режима питания на выходные характеристики.

При определении интенсивности свечения ионизированного 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 использовались осветитель типа ОИ-24. Для исключения попадания побочных засветок на фотокатод освещение ФП осуществлялось через кремниевый фильтр, отсекающий излучение, к которому чувствителен данный тип ФЭУ.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты исследования фотоэлектрических, преобразовательных и выходных характеристики, а также зависимости интенсивности свечения газа и люминесцентного экрана от величины тока при различных значениях газоразрядного промежутка ( $d_g = 10\text{--}100$  мкм) и остаточного давления ( $P = 38\text{--}190$  Тор).

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Принцип работы ионизационной системы позволяет построить два варианта преобразователей изображений, 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. Надо отметить, что в первом варианте спектральная характеристика выходного сигнала определяется спектральной характеристикой 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 для получения наибольшей яркости выходного сигнала необходимо подбирать оптимальный режим работы системы, исходя из энергетического баланса расходуемой в газовом разряде мощности. Если проследить на диаграммах [8] распределение относительных долей расходуемой по различным мощностям, построенной функции  $E/p$ , то можно легко заметить, что наибольшая яркость свечения люминофора (считаем, что 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 к прекращению разряда в газовом зазоре. В этом случае для поддержания разряда необходимо повышение рабочего напряжения, что может привести к выходу из строя ФП.

Если в преобразователе изображений с использованием свечения газа важнейшие параметры (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 и одинаковыми по размерам. 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 включает полупроводниковый и прозрачный электроды, разделенные диэлектрической прокладкой с отверстием диаметром 15 мм, которое формирует газоразрядную область. Толщина прокладки определяет значение  $d_g$ , которое изменялось в наших опытах в диапазоне 0,01–0,1 мм. Полупроводниковый электрод (полуизолирующий GaAs) диаметром 25 мм и толщиной ~1 мм, служил также фотоприемником устройства. На внешней стороне фотоприемника изготавливался полупрозрачный электрический контакт, изготовленный методом напыления в вакууме тонкой пленки металла (Ni). В качестве анода использовалась стеклянная пластина, покрытая проводящим слоем SnO<sub>2</sub> [4].

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты, полученные при комнатной температуре для систем с GaAs ФП.

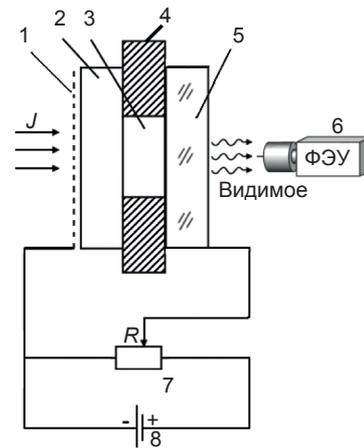


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. 1 — полупрозрачный контакт, 2 — полупроводниковый фотоприемник, 3 — газоразрядный промежуток, изготовленный из слюды, 4 — слюдяная фольга с центральным круглым отверстием, 5 — волоконно-оптическая шайба, 6 — фотоэлектронный умножитель, 7 — внешнее сопротивление, 8 — источник постоянного тока-УИП-2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны ВАХ зависимости интенсивности свечения экрана преобразователя от приложенного напряжения при некоторых фиксированных значениях  $p$ ,  $d$  и интенсивности освещения ФП. При  $U > U_{пр}$  свечение линейно растет с увеличением приложенного напряжения. Поскольку ВАХ системы линейна, то интенсивность свечения оказывается пропорциональной току системы.

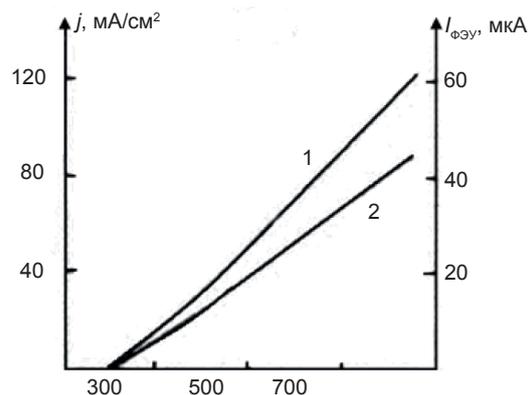


Рис. 2. ВАХ система (кривая 1) и зависимость интенсивности свечения экрана преобразователя от напряжения (кривая 2)

Следует отметить, что во всем исследованном диапазоне токов свечение газа и люминесцентного экрана практически линейно следует за током системы. При этом коэффициенты пропорциональности,

связывающие свечение величины остаточного давления газа (при неизменных толщине зазора и интенсивности падающего света) на вид зависимостей выходного свечения от тока показано на рис. 3. С увеличением разрежения при прочих равных условиях яркость свечения экрана растет. Следует отметить, что при малых остаточных давлениях (при  $p < 30$  мм рт. ст.) однородность свечения экрана ухудшается. По-видимому, в условиях малой плотности газа в межэлектродном пространстве возрастает влияние свойств поверхностей электродов (загрязнений, микронеровностей), на характер пробоя.

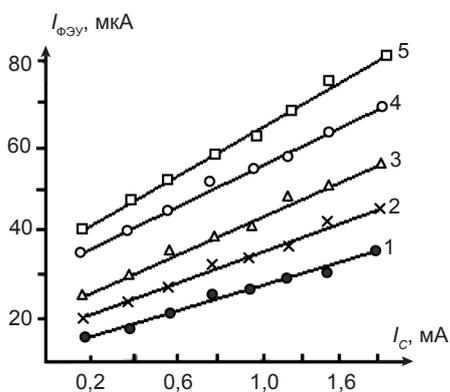


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения экрана от величины тока при различных давлениях.  $P$ , Тор: 1 — 190; 2 — 152; 3 — 114; 4 — 76; 5 — 38

На рис. 4 представлены данные по зависимости интенсивности свечения экрана от величины давления газа для разных толщин газоразрядного промежутка. Кривые получены для одинаковой интенсивности освещения ФП и некоторого выбранного значения тока газоразрядного промежутка. Видно, что эффективность преобразования излучения растет при уменьшении  $d$ . Излучение влияния величины параметров разрядного промежутка на свечение ионизованного газа показало, что в противоположность системе с люминесцентным экраном уменьшение  $d$  и  $P$  в общем случае приводят к снижению эффективности преобразования излучения (рис. 5).

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)

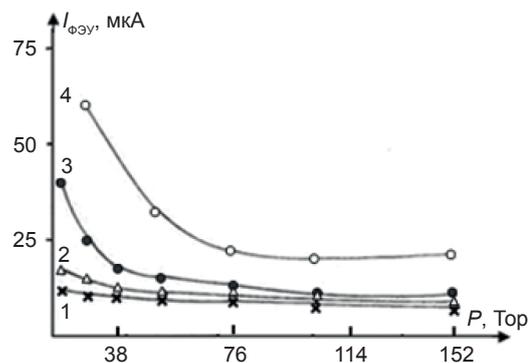


Рис. 4. Зависимость интенсивности свечения экрана от параметров разрядного промежутка.  $d$ , мкм: 1 — 100; 2 — 50; 3 — 30; 4 — 10.  $I_c = 0,2$  мА

было однородным и 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 поверхностного сопротивления полупроводника может способствовать шнурованию тока в газоразрядном промежутке. Другой причиной нарушения равномерности могут быть инжекционные явления в полупроводнике.

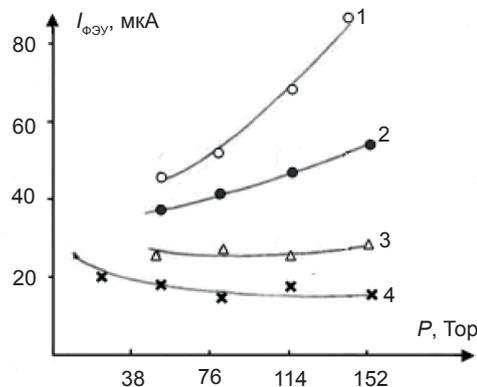


Рис. 5. Зависимость интенсивности свечения газа от параметров разрядного промежутка.  $d$ , мкм: 1 — 100; 2 — 50; 3 — 30; 4 — 10.  $I_c = 0,2$  мА

Из приведенных экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что распределение поля в зазоре неоднородно, следовательно неоднородно и 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 должно повышать эффективность возбуждения электронами люминофора и увеличивать 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 к расширению области катодного падения потенциала.

Таким образом, уменьшение  $p$ , и  $d$  при сохранении неизменной плотности тока должны увеличивать яркость экрана, что подтверждается результатами рис. 4.

В случае регистрации свечения газа вклад в 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  $i \cdot U_{пр}$ . При постоянной плотности тока выходная яркость должна быть пропорциональна  $U_{пр}$ . Сравнение данных рис. 5 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 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Важными характеристиками преобразователей, определяющих их чувствительность

и динамический диапазон входных интенсивностей, являются выходные характеристики (ВХ). На рис. 6 и рис. 7 показаны семейства ВХ преобразователей с люминесцентным экраном и светящимся газоразрядным промежутком для случая использования полуизолирующего арсенид-галлиевого ФП. Кривые получены для некоторых фиксированных параметров воздушного зазора при различных напряжениях питания. Выходная яркость выражена (как и в предыдущем разделе) в относительных единицах.

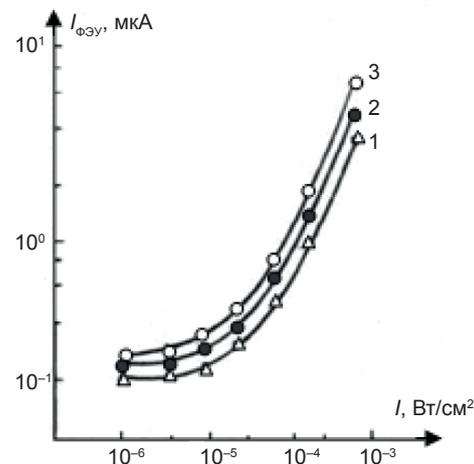


Рис. 6. Выходные характеристики преобразователя с люминесцентным экраном.  $d = 100$  мкм,  $P = 76$  Тор.  $U$ , В: 1 — 800; 2 — 900; 3 — 1000

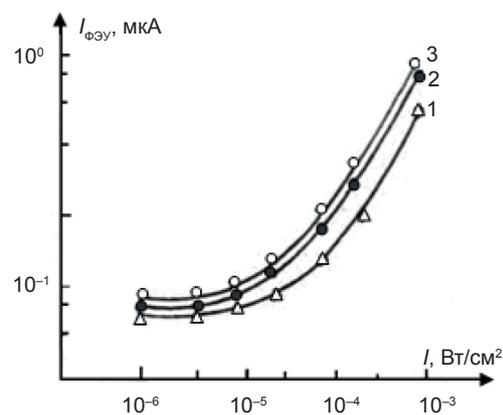


Рис. 7. Выходные характеристики преобразователя со светящимся разрядным промежутком,  $d = 100$  мкм,  $P = 76$  Тор.  $U$ , В: 1 — 800; 2 — 900; 3 — 1000

На рис. 8 приведены подобные зависимости для охлаждаемого преобразователя со светящимся газоразрядным промежутком при использовании в качестве ФП кремния, компенсированного цинком. Кривые получены для некоторых фиксированных параметров

воздушного зазора при различных напряжениях питания. Выходная яркость выражена в относительных единицах.

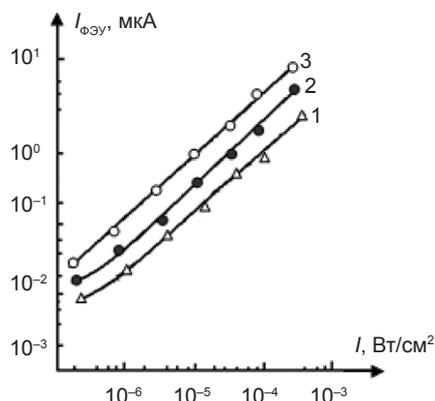


Рис. 8. ВХ преобразователя со светящимся разрядным промежутка для ФП из Si (Zn).  $d = 100$  мкм,  $P = 76$  Тор.  $U$ , В: 1 — 800; 2 — 900; 3 — 1000

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 «темное» свечение (т. е. свечение экрана и ионизованного газа при отсутствии входного сигнала) за счет роста темного тока системы при увеличении напряжения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе фотографических систем ионизационного типа предложены и разработаны полупроводниковые преобразователи ИК изображений в видимые, 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 преобразователями изображений с электронным усилением (ЭОП), электролюминесцентными преобразователями и системами с поэлементным считыванием ИК изображения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Selected papers from the 2<sup>nd</sup> Int. Workshop on Microplasmas (IWM-2004, Hoboken, NJ, USA, 6–8 October 2004) // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2005. — Vol. 38. — No. 11.

2. Астров Ю. А., Шуман В. Б., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Махова А. Н. Разработка фотоприемников для преобразователей изображений: легирование кремния селеном из газовой фазы // ФТП. — 2008. — Vol. 42(4). — P. 457–462.
3. Астров Ю. А., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М. Гексагональные структуры тока в системе полупроводник-газоразрядный промежуток // ЖТФ. — 2011. — Vol. 81(2). — P. 42–47.
4. Лодыгин А. Н., Астров Ю. А., Порцель Л. М., Берегулин Е. В. Динамика таунсендовского разряда в аргоне // ЖТФ. — 2015. — Vol. 85(5). — P. 27–31.
5. Туланов В. В., Сиябеков Х. Б., Давлетова А. Ш., Ортаева К. А. Полупроводниковый преобразователь инфракрасных изображений ионизационного типа на основе Si(S) с чувствительностью в спектральном диапазоне излучение CO<sub>2</sub> лазера // ФТП. — 2001. — Vol. 35(4). — P. 1009–1012.
6. Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Астров Ю. А. Газовый разряд в аргоне и азоте при криогенной температуре в тонких зазорах // Письма в ЖТФ. — 2008. — Vol. 34(14). — P. 61–66.
7. Парицкий Л. Г., Хайдаров З., Мухамадиев О., Дадабоев О. Исследование пространственной стабилизации тока в системе полупроводник — газовый разряд // ФТП. — 1993. — Vol. 27(11/12). — P. 2009–2016.
8. Касымов Ш. С. Разработка и исследование новых типов электроуправляемых фотографических систем и преобразователей инфракрасных изображений: Автореф. дис. канд. физ. -мат. наук. — Л., 1979, — 21 с.

### LITERATURA

1. Selected papers from the 2nd Int. Workshop on Microplasmas (IWM-2004, Hoboken, NJ, USA, 6–8 October 2004) // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2005. — Vol. 38. — No. 11.
2. Astrov Yu. A., Shuman V. B., Lodygin A. N., Porcel' L. M., Mahova A. N. Razrabotka fotopriemnikov dlya preobrazovatelej izobrazhenij: legirovanie kremniya selenom iz gazovoj fazy // FTP. — 2008. — Vol. 42(4). — P. 457–462.
3. Astrov Yu. A., Lodygin A. N., Porcel' L. M. Geksagonal'nye struktury toka v sisteme poluprovodnik-gazorazryadnyj promezhutok // ZhTF. — 2011. — Vol. 81(2). — P. 42–47.
4. Lodygin A. N., Astrov Yu. A., Porcel' L. M.,

- Beregulin E. V. Dinamika taunsendovskogo razryada v argone // ZhTF. — 2015. — Vol. 85(5). — P. 27–31.
5. Tulanov V. V., Siyabekov H. B., Davletova A. Sh., Ortaeva K. A. Poluprovodnikovyy preobrazovatel' infrakrasnyh izobrazhenij ionizacionnogo tipa na osnove Si(S) s chuvstvitel'nost'yu v spektral'nom diapazone izluchenie CO<sub>2</sub> lazera // FTP. — 2001. — Vol. 35(4). — P. 1009–1012.
6. Lodygin A. N., Porcel' L. M., Astrov Yu. A. Gazovyy razryad v argone i azote pri kriogennoj temperature v tonkih zazorah // Pis'ma v ZhTF. — 2008. — Vol. 34(14). — P. 61–66.
7. Parickij L. G., Hajdarov Z., Muhamadiev O., Dadaboev O. Issledovanie prostranstvennoj stabilizacii toka v sisteme poluprovodnik — gazovyy razryad // FTP. — 1993. — Vol. 27(11/12). — P. 2009–2016.
8. Kasymov Sh. S. Razrabotka i issledovanie novyh tipov elektroupravlyaemyh fotograficheskikh sistem i preobrazovatelej infrakrasnyh izobrazhenij: Avtoref. dis. kand. fiz. -mat. nauk. — L., 1979, — 21 p.