

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИОНИЗАЦИОННОГО ТИПА

Х. Т. Юлдашев, Б. З. Хайдаров, Ш. С. Касымов

Ферганский политехнический институт,

г. Фергана

Поступила в редакцию 27.03.2015

Приведены экспериментальные результаты исследований вольт-амперных, люкс-амперных и фотографических характеристик полупроводниковой фотографической системы ионизационного типа со сверхтонкой газоразрядной ячейкой. В качестве источника света использовался осветитель типа ОИ-24. Изменение интенсивности излучения, попадающего на вход системы, осуществлялось набором сеточных калиброванных фильтров. Рабочий диапазон спектра излучений и устранение фоновой засветки обеспечивались с помощью набора интерференционных и полупроводниковых светофильтров.

Ключевые слова: полупроводниковая фотографическая система, полупроводниковый электрод, люкс-амперная характеристика, вольт-амперная характеристика, фотоэлектрическая характеристика, ионизационная камера, газоразрядный промежуток, удельное сопротивление полупроводника, прозрачный электрод.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ І ФОТОГРАФІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ФОТОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ ІОНІЗАЦІЙНОГО ТИПУ

Х. Т. Юлдашев, Б. З. Хайдаров, Ш. С. Касимов

Наведено експериментальні результати досліджень вольт-амперних, люкс-амперних і фотографічних характеристик напівпровідникової фотографічної системи іонізаційного типу з надтонким газорозрядним осередком. В якості джерела світла застосовувався освітлювач типу ОИ-24. Змінювання інтенсивності випромінювання, що потрапляє на вхід системи, здійснювалося набором сіткових каліброваних фільтрів. Робочий діапазон спектра випромінювань і усунення фонові засвіткі забезпечувалися за допомогою набору інтерференційних і напівпровідникових світлофільтрів.

Ключові слова: напівпровідникова фотографічна система, напівпровідниковий електрод, люкс-амперна характеристика, вольт-амперна характеристика, фотоелектрична характеристика, іонізаційна камера, газорозрядний проміжок, питомий опір напівпровідника, прозорий електрод.

THE STUDY OF PHOTOELECTRIC AND PHOTOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR PHOTOGRAPHIC SYSTEM IONISATION TYPE

H. T. Yuldashev, B. Z. Khaydarov, S. S. Kasymov

In work are brought results of the experimental studies of the current-voltage, photovoltaic and semiconductor ampere characteristics of photographic systems ionization type. The light source used illuminator OI-24 type. Changing the intensity of the radiation incident on the input of the system, carried out a set of grid calibrated filters. The working range of the spectrum of radiation and eliminating backlight were provided with a set of interference filters and semiconductor.

Keywords: semiconductor photographic systems, semiconductor electrode, lux-ampere characteristic, the current-voltage characteristics of photovoltaic characteristic ionization chamber, discharge gap, the resistivity of the semiconductor, a transparent electrode.

ВВЕДЕНИЕ

Основная часть полупроводниковой фотографической ионизационной камеры (ПФИК) является «газоразрядная ячейка». В ПФИК газоразрядная ячейка работает в режиме

сквозного тока. Высокая чувствительность в системе достигается в том случае, если входной сигнал (свет) вызывает значительный фототок в заданной спектральной области. Следовательно, спектральная и люкс-амперная

характеристики фотографической системы являются одними из определяющих параметров фотоприемников [1].

Полупроводниковая фотографическая система ионизационного типа (так называлась ПФИК изобретателями [1]) в том виде, как она предложена в известных работах основана на использовании: а) эффекта стабилизации газового разряда в ячейке с распределенным резистивным электродом и б) эффекта управления током газового разряда по площади и по интенсивности во времени. При этом электрод выполнен из фоточувствительного полупроводникового материала с одинаковыми характеристиками по всей площади. Именно такие фотографические системы доведены до известной степени технического совершенства и в настоящее время достаточно широко применяются для различных целей регистрации изображений, в частности в инфракрасной области спектра [2–6].

Целью настоящей работы является исследование вольтамперных, люкс амперных, фотографических и других характеристик газоразрядной ячейки с чрезмерно тонким газовым зазором (менее 100 мкм) и сопоставление их с ранее полученными результатами для расширения возможностей практического применения ПФИК.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Принципиальная схема полупроводниковой ионизационной фотографической системы приведена на рис. 1. Система состоит из полупроводниковой фоточувствительной пластины (1), снабженной полупрозрачным электродом (2). Внутренняя поверхность пластины отделена от поверхности регистрирующего слоя (4) газовым зазором (3). Регистрирующий слой (4) располагается на прозрачном проводящем контрэлектроде (5), выполненном, например, из стеклянной пластинки, покрытой проводящей пленкой SnO_2 . При подключении к системе напряжения происходит пробой газового разряда, отличающийся тем, что в разрядной ячейке присутствует распределенное сопротивление полупроводника, способствующее демпфированию токовых неустойчивостей.

Сопротивление, полупроводника полностью определяет величину плотности тока по площади сечения и при освещении полупроводника может управлять величиной и распределением тока в газовом зазоре.

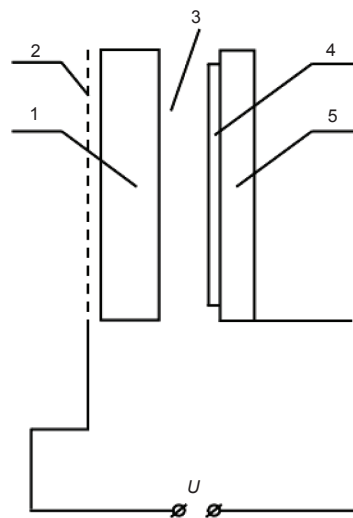


Рис. 1. Принципиальная схема полупроводниковой фотографической системы ионизационного типа

Основной целью исследований, в настоящей работе, является установление связи между сенситометрическими характеристиками системы и параметрами элементов, входящих в систему и на этой основе определение оптимальных режимов эксплуатации фотографических систем. При этом проводились измерения, определение характеристик системы в целом и характеристик отдельных элементов. Анализ формирования изображения и соответствующие выводы по выбору оптимальных условий съемки проводились сопоставлением этих результатов между собой и с известными литературными данными. Был проведен ряд исследований вольт-амперных и люкс-амперных характеристик прибора и фотоприемников в отдельности. Также проводилось исследование ВАХ газового разряда между металлическими электродами в условиях, приближенных к условиям протекания разряда в исследуемых системах. Исследовалось влияние параметров газоразрядного промежутка и режима питания на интенсивность свечения газа и люминесцентного экрана. Также был проведен цикл исследований для изучения разрешающей способности систем, работающих в преобразовательном режиме. Для фотографических систем

исследование сенситометрических характеристик проводилось для технических вариантов, в которых применялись фотоэмульсионные материалы.

Опыты проводились как с использованной постоянного напряжения питания, так и в импульсном режиме. Источник питания позволял изменять величину напряжения в диапазоне $0-2,5 \cdot 10^3$ В. Импульсный генератор имел длительность импульса $5-2 \cdot 10^3$ мкс с амплитудой до $4 \cdot 10^3$ В. В режиме постоянного тока осуществлялась запись ВАХ, а также зависимостей интенсивности свечения люминесцентного экрана и ионизованного газа разрядного промежутка в зависимости от величины приложенного напряжения, осуществлялась с помощью двухкоординатного самописца. Интенсивность свечения в обоих случаях определялась с помощью ФЭУ (тип 19А). Линейность работы ФЭУ обеспечивалась нейтральными фильтрами, устанавливаемыми перед его входным окном. В качестве источника света использовался осветитель типа ОИ-24. Изменение интенсивности излучения, попадающего на вход системы, осуществлялось набором сеточных калиброванных фильтров. Рабочий диапазон спектра излучений и устранение фоновой засветки обеспечивались с помощью набора интерференционных и полупроводниковых светофильтров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вольт-амперные характеристики

Исследование ВАХ является важным этапом при определении связи между фотоэлектрическими характеристиками ФП и системой ФП-газовый зазор и при изучении влияния параметров разрядного промежутка на свойства системы в целом.

Результаты исследований показали, что электрические процессы, происходящие в рассматриваемых системах, практически не зависят от температурных режимов проведения опытов. Поэтому, исходя из чисто технических соображений, наиболее полный цикл исследований был проведен для систем, работают при комнатной температуре. Основная часть результатов получена в преобразовательном режиме с использованием

полуизолирующего ФП ($\rho = 10^7-10^9$ Ом·см) из арсенида галлия.

На рис. 2 показано семейство ВАХ системы при постоянных величинах давления газа P и длине разрядного промежутка d (76 мм рт. ст. и 100 мкм соответственно) Параметрами кривых является интенсивность освещения ФП I . В качестве источника света использовался осветитель ОИ-24.

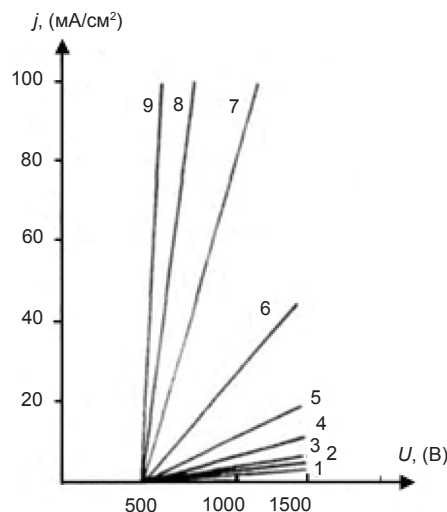


Рис. 2. ВАХ системы при различных интенсивностях света. $d = 100$ мкм, $p = 76$ мм рт. ст. I , Вт/см². 1 — 0, 2 — $2,4 \cdot 10^{-5}$, 3 — $3,7 \cdot 10^{-5}$, 4 — $6 \cdot 10^{-5}$, 5 — $1,8 \cdot 10^{-4}$, 6 — $5,2 \cdot 10^{-4}$, 7 — $1,3 \cdot 10^{-3}$; 8 — $1,1 \cdot 10^{-2}$; 9 — $4,6 \cdot 10^{-2}$

Видно, что при малой величине U ток системы практически отсутствует. При достижении некоторого критического значения напряжения $U_{пр}$ (для данного случая $U_{пр} = 500$ В) появляется ток, линейно растущий с дальнейшим увеличением U . Крутизна ВАХ в послепробойной области увеличивается с ростом интенсивности освещения.

На рис. 3 изображены перестроенные из предыдущего рисунка ЛАХ системы для двух значений приложенного напряжения. Видно что изменение напряжения приводит лишь к параллельному сдвигу характеристик. Это является следствием линейности вольт-амперных зависимостей при $U > U_{пр}$.

На рис. 4 показано влияние изменения длины разрядного промежутка на вид ВАХ системы при некоторых фиксированных величинах P и I . Наклон ВАХ остается постоянным и изменение d меняет лишь величину $U_{пр}$. Данные рис. 2 и 4 получены для зазоров, наполненных воздухом. Как показали опыты, при изменении состава газа, а также p и d

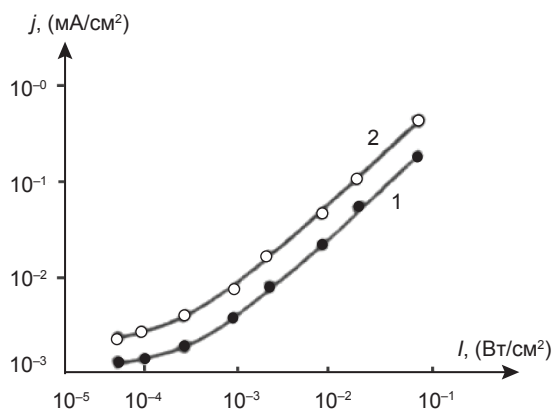


Рис. 3. ЛАХ системы для двух величин приложенного напряжения U , В: 1 — 800, 2 — 900

($p = 76$ мм рт. ст. и 30–100 мкм соответственно), менялась только величина $U_{пр}$, а наклон ВАХ в послепробойной области оставался

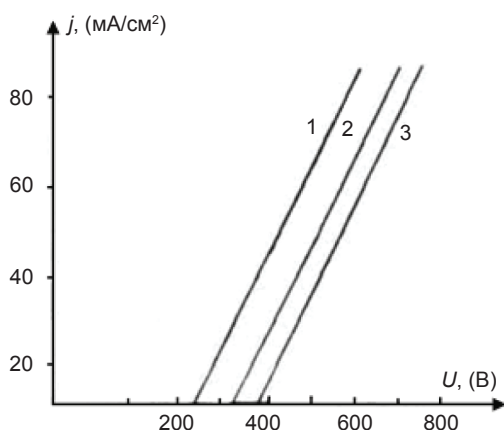


Рис. 4. ВАХ системы при различных толщинах газоразрядного промежутка, $p = 76$ мм. рт. ст.

неизменным. На рис. 5 показано влияние изменения параметров газоразрядного промежутка на напряжение пробоя. При больших величинах d (кривые 1, 2) $U_{пр}$ растет в исследованном диапазоне давлений. Эти результаты согласуются с законом Пашена. Следует отметить, что

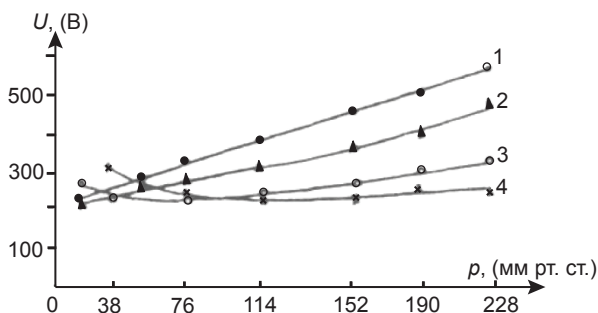


Рис. 5. Изменение напряжения пробоя в зависимости от разрядного параметра газоразрядного воздушного промежутка d , мкм: 1 — 150, 2 — 100, 3 — 30, 4 — 20

в случае различных газов напряжение пробоя изменялось незначительно. Для сопоставления полученных фотоэлектрических характеристик системы со свойствами ФП последний извлекался из системы и на его поверхность, ранее обращенную в сторону разрядного промежутка, наносился омический контакт. Далее проводились измерения ВАХ при тех же интенсивностях света, что и при исследовании всей системы. В результате опытов установлено, что в диапазоне удельных сопротивлений ФП $\rho = 5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8$ Ом·см (определяемых интенсивностью света) в пределах точности экспериментов крутизна ВАХ системы при $U > U_{пр}$ определяется сопротивлением полупроводника. При больших удельных сопротивлениях возрастает роль краевых эффектов, т. е. значительная доля общего тока системы переносится по краям газоразрядного промежутка. В этом случае однозначное соответствие между крутизной ВАХ системы и ФП отсутствует. Исследование ВАХ системы в импульсном режиме показало, что эти характеристики линейны вплоть до весьма значительных плотностей тока. На рис. 6 изображена одна из таких зависимостей, снятая при питания импульсами напряжения длительностью 180 мкс.

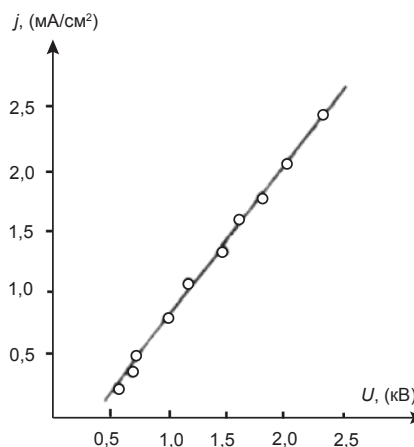


Рис. 6. ВАХ в импульсном режиме, $d = 60$ мкм, $p = 76$ мм рт. ст., $\tau_{имп} = 180$ мкс

Из описанных выше результатов следует, что в широком интервале тока дифференциальное сопротивление системы ФП — газоразрядный промежуток совпадает с сопротивлением использованного полупроводника и наличие плазменного контакта в исследованном нами случае не оказывает влияния на поперечную

проводимость ФП. В общем случае в рассматриваемой системе может возникнуть положительная обратная связь за счет того, что свечение ионизованного газа и бомбардировка поверхности полупроводника электронно-ионным потоком будут увеличивать (вдобавок к внешнему освещению) проводимость ФП.

Таким образом, в послепробойной области дифференциальное сопротивление разрядного промежутка обращается в ноль, т. е. ВАХ газа вертикальна. Процесс управления током разряда можно упрощенно представить рис. 7.

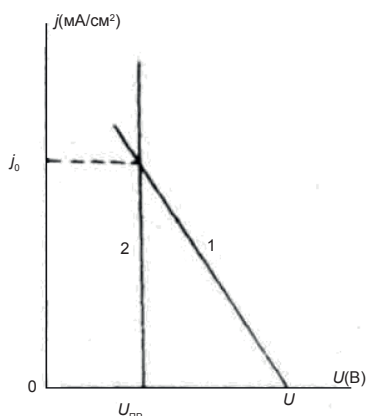


Рис. 7. График, поясняющий процесс управления током разрядного промежутка

Плотность тока определяется точной встречи нагрузочной кривой I (ее наклон определяется сопротивлением ФП) с ВАХ разрядного промежутка (кривая 2). Из вышеизложенного следует, что ЛАХ системы при $U > U_{np}$ должно совпадать с соответствующей характеристикой ФП. Это подтверждается сравнением рис. 3 и рис. 8 для полуизолирующего арсенид-галлиевого ФП и сравнением соответствующих зависимостей для ФП.

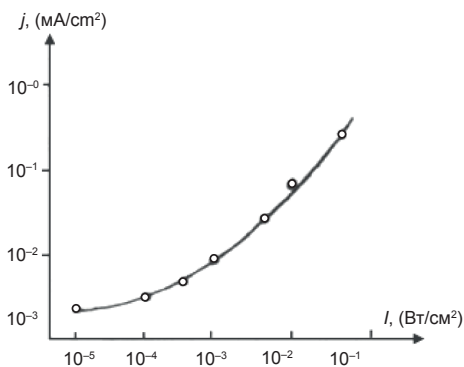


Рис. 8. ЛАХ полуизолирующего ФП из GaAs. $U = 200$ В

Фотографические характеристики

Поскольку в наших системах для определения основных сенситометрических характеристик

целесообразно использовать характеристическую кривую, выражающую зависимость между логарифмом количества освещения $\lg H$ (то есть, экспозиция — произведение интенсивности света на время экспонирования) и оптической плотностью почернения D , то конечной целью сенситометрических исследований явилось построение $D(\lg H)$ характеристик. Построение экспериментальных характеристических кривых приводилось, в основном, по результатам измерения оптической плотности почернения (ослабления) исследуемого участка изображения. Однако не исключена возможность построения характеристической кривой и другими методами, например, при известной зависимости плотности почернения регистрирующей пленки от логарифма количества электричества, вызвавшего фотографический эффект, а также известной ЛАХ ФП, можно воспользоваться диаграммой преобразования входной интенсивности I в оптическую плотность D . Наиболее полные исследования фотографических характеристик были проведены для двух вариантов записи изображения на фотоэмульсионных слоях, в которых регистрировалось свечение ионизованного газа и люминесцентного экрана.

Ниже приводятся экспериментальные результаты, полученные для фотографической системы с использованием арсенид-галлиевого (исследования проводились при комнатной температуре) и кремниевых фотоприемников. При этом были изучены зависимости оптической плотности почернения различных фотоэмульсионных пленок от времени экспозиции при фиксированном освещении ФП и зависимости плотности почернения от интенсивности света при фиксированном времени экспозиции. Определение оптической плотности пленок проводилось в проходящем свете микрофотометром МФ-4.

На рис. 9а и 9б показаны зависимости плотности почернения от интенсивности падающего на ФП излучения при различных временах экспозиции, полученные для арсенид-галлиевого ФП при регистрации изображения с использованием прозрачного электрода (а) и с использованием оптоволоконного светопровода с люминесцентным экраном (б).

Из этих данных следует, что в обоих использованных методах при регистрации

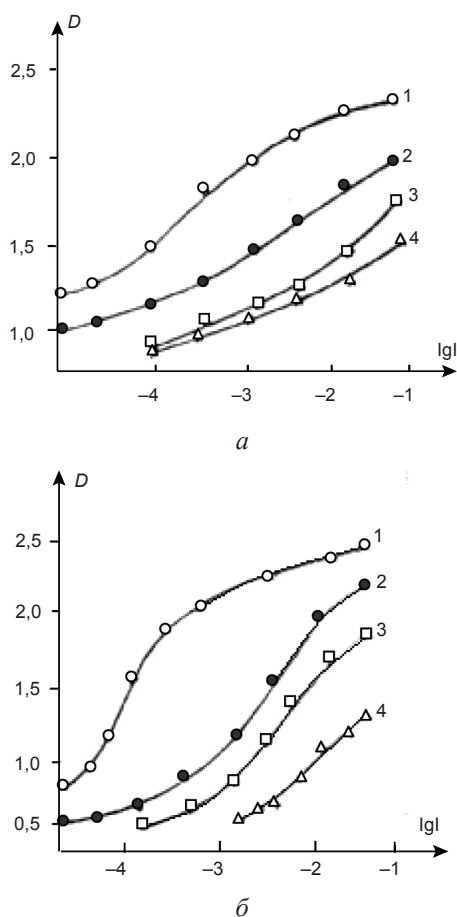


Рис. 9. Зависимости плотности почернения от интенсивности света при различных временах экспонирования 1 — $5 \cdot 10^{-4}$ с, 2 — 10^{-4} с, 3 — $5 \cdot 10^{-5}$ с, 4 — $2 \cdot 10^{-5}$ с полученные для арсенида галлиевого ФП прозрачного электрода (а) и при использовании светопровода с люминесцентным экраном (б). $p = 76$ мм рт. ст., $d = 50$ мкм, $U = 1,8$ кВ

изображения на фотопленку достигается достаточно высокая энергетическая чувствительность. Вместе с тем в случае регистрации свечения ионизованного газа пороговая интенсивность света ниже, чем при использовании люминесцентного экрана. Особенно это заметно при коротких временах экспозиции. Следует отметить, что в системе с люминесцентным экраном нами использовался тип люминофора имеющего время разгорания и спада свечения порядка нескольких миллисекунд. В этих условиях светоотдача люминофора будет сверхлинейно уменьшаться при сокращении времени выдержки, что приводит к уменьшению чувствительности системы при коротких временах экспозиции. При увеличении времени экспозиции чувствительность системы с использованием обоих методов регистрации выравнивается. По всей видимости, использование более быстродействующего

люминофора позволит повысить чувствительность фотосистемы с люминесцентным экраном.

На рис. 10 показаны зависимости плотности почернения от величины экспозиции при различных амплитудах приложенного напряжения, полученные при регистрации изображения с использованием сетчатого электрода на фотопленку РФ-3. Видно, что с увеличением напряжения чувствительность фотопроцесса растет. Этот факт, подтверждающий справедливость формулы для определения максимальной энергетической чувствительности, легко может быть объяснен, исходя из данных по исследованию эффективности преобразования входного сигнала в выходной в преобразователе изображений с использованием свечения газа.

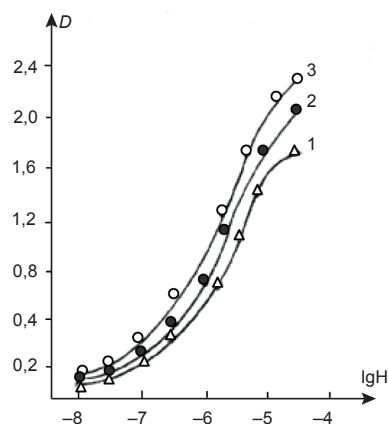


Рис. 10. Характеристические кривые фотопроцесса при фотографировании на фотопленки РФ-3 с GaAs ФП для трех значений приложенного напряжения. U , кВ: 1 — 1,4; 2 — 1,6; 3 — 1,3. $p = 76$ мм рт. ст. $d = 30$ мкм

На рис. 11 приведены характеристические кривые, снятые при различных значениях давления газа в зазоре. Характерно, что при неизменном значении $\lg H$ плотность почернения растет с уменьшением давления газа и при дальнейшем уменьшении давления спадает. Эти результаты согласуются с данными по распределению долей расходуемой мощности разряда в газе по различным каналам.

При малой интенсивности поступающего света длительность выдержки должна увеличиваться. При этом возрастает роль темнового тока системы, вуалирующего регистрирующую пленку. Таким образом, наличие темнового тока в системе ограничивает время экспонирования до $t_s \leq 10^2$ с. Сравнение данных показывает, что увеличение толщины газового промежутка

повышает энергетическую чувствительность системы. Это обусловлено увеличением эффективности преобразования поступающего излучения в интенсивность свечения газа при больших d .

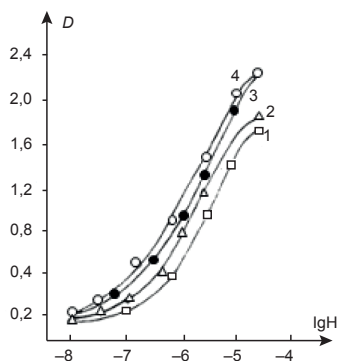


Рис. 11. Характеристические кривые фото процесса, измеренные для различных значений давления газа в зазоре. p , мм рт. ст.: 1 — 228; 2 — 138; 3 — 76; 4 — 38 $U = 1,3$ кВ, $d = 60$ мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены подробные исследования фотографических показателей экспериментальных образцов ионизационных фотографических систем и изучено влияние на них различных факторов. Выявлены большие возможности дальнейшего повышения фотографических характеристик. Достигнутый уровень фотографических показателей на макетных лабораторных образцах характеризуется следующими данными: чувствительность порядке 5–10 ед. ($5 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$ см²/Дж), фотографическая широта $L \sim 1,5$ и разрешающая способность $R \sim 15-20$ мм⁻¹, граничная длина волны 4,5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касымов Ш. С. Разработка и исследование новых типов электроруляемых фотографических систем и преобразователей инфракрасных изображений / Автореф. дис. ... канд. физ. -мат. наук. — Л., 1979. — 21 с.
2. Hajdarov Z. Advanced Semi-Conductor Ionization Chamber on the Basis of an Image Intensifier (II) at the Thermoelectric Cooling // Abstracts of XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photo electronics and Night Vision Devices, Moscow, Russia, 2004. — 109 p.
3. Хайдаров З. Особенности автоэлектронной эмиссии в сверхтонком зазоре газоразрядной ячейки в полупроводниковой ионизационной камере // Физическая инженерия поверхности. — 2006. — Т. 3, № 1–2. — С. 207–209.

4. Касымов Ш. С., Хайдаров З., Хомидов В. О., Юлдашев Х. Т., Отажонов С. М. Исследование влияния токового усиления на фотоэлектрические и выходные характеристики преобразователя изображений ионизационного типа // Физическая инженерия поверхности. — 2011. — Т. 9, № 4. — С. 376–379.
5. Хайдаров З. Положительный фотографический эффект в чрезмерно тонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом // Узбекский физический журнал. — 2012. — № 1. — С. 114–122.
6. Касымов Ш. С., Хайдаров З., Юлдашев Х. Т. Электрические свойства чрезмерно тонкой газоразрядной ячейки с полупроводниковым электродом // Узбекский физический журнал. — 2012. — № 4. — С. 241–248.

LITERATURA

1. Kasymov Sh. S. Razrabotka i issledovanie novykh tipov elektroupravlyaemykh fotograficheskikh sistem i preobrazovatelej infrakrasnykh izobrazhenij / Avtoref. dis. ... kand. fiz. -mat. nauk. — L., 1979. — 21 p.
2. Hajdarov Z. Advanced Semi-Conductor Ionization Chamber on the Basis of an Image Intensifier (II) at the Thermoelectric Cooling // Abstracts of XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photo electronics and Night Vision Devices, Moscow, Russia, 2004. — 109 p.
3. Hajdarov Z. Osobennosti avtoelektronnoj emissii v sverhtonkom zazore gazorazryadnoj yachejki v poluprovodnikovoj ionizacionnoj kamere. // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2006. — Vol. 3, No. 1–2. — P. 207–209.
4. Kasymov Sh. S., Hajdarov Z., Homidov V. O., Yuldashev H. T., Otazhonov S. M. Issledovanie vliyaniya tokovogo usileniya na fotoelektricheskie i vyhodnye harakteristiki preobrazovatelya izobrazhenij ionizacionnogo tipa // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2011. — Vol. 9, No. 4. — P. 376–379.
5. Hajdarov Z. Polozhitel'nyj fotograficheskij effekt v chrezmerno tonkoj gazorazryadnoj yachejke s poluprovodnikovym elektrodom // Uzbekskij fizicheskij zhurnal. — 2012. — No. 1. — P. 114–122.
6. Kasymov Sh. S., Hajdarov Z., Yuldashev H. T. Elektricheskie svojstva chrezmerno tonkoj gazorazryadnoj yachejki s poluprovodnikovym elektrodom // Uzbekskij fizicheskij zhurnal. — 2012. — No. 4. — P. 241–248.