
О ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ ФОТОТОКА ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИОНИЗАЦИОННОГО ТИПА

Ш.С. Касымов, Л.Г. Парицкий, З. Хайдаров, В.О. Хомидов, С.М. Отажонов

*Ферганский государственный университет
Узбекистан*

Поступила в редакцию 30.08.2010

В настоящей работе рассматриваются возможности усиления фототока плазмы газового разряда в преобразователях изображений на регистрирующих средах. Это достигается тем, что включение дополнительного электрода в разрядном промежутке и с этим создается возможность значительного понижения рабочего напряжения на фотоприемнике и усиления фототока плазмы газового разряда в преобразователях изображений.

Ключевые слова: фотография, фотопроводимость, заряд электрона, частота излучения, изображения, вольт-амперная характеристика, полупроводниковые фотоприёмник, фотоэлектрическая свойства полупроводников, коэффициент усиления, положительный заряд, область объемного заряда.

У цій роботі розглядається можливості посилення фотоструму плазми газового розряду у перетворювачах зображень на середовищах, що реєструють. Це досягається тим, що включення додаткового електрода в розрядному проміжку створює можливість значного зниження робочої напруги на фотоприймачі й посилення фотоструму плазми газового розряду в перетворювачах зображень.

Ключові слова: фотографія, фотопровідність, заряд електрона, частота випромінювання, зображення, вольт-амперна характеристика, напівпровідникові фотоприймач, фотоелектрична властивості напівпровідників, коефіцієнт підсилення, позитивний заряд, область об'ємного заряду.

The possibilities of strengthening plasma photocurrent of gaz discharge in the representation transformers on the register medium have been examined in this work. It is achieved by switching on additional electrode in the discharge gap and by significant drop in tension on the photoreciver and intensification of photocurrent plazma of gaz discharge in representation transformers.

Keywords: photography, photoconductivity, charge electron, frequency of radiation, the image, volt-ampere characteristic, semi-conductor a photodetector, photo-electric properties of semi-conductors, strengthening factor, a positive charge, area of a volume charge.

В последнее время, определенное применение нашли фотографические системы и преобразователи изображений ионизационного типа [1 – 4]. Однако важным препятствием их дальнейшего распространения является недостаточно эффективное использование энергии газового разряда при записи изображение на регистрирующей среде. Это объясняется тем, что в ионизационных системах, хотя имеет место усиление по мощности, определяемое выражением [2], отсутствует усиление тока в газоразрядном промежутке:

$$\eta = G \frac{eV}{h\nu},$$

где G – коэффициент фотоэлектрического усиления, V – приложенное напряжение,

e – заряд электрона, h – постоянная Планка, ν – частота излучения.

Это создает определенные препятствия в тех случаях, когда для записи требуются значительные плотности токов (например, для записи изображений без проявления и других видов лабораторной обработки), а также для регистрации малых световых потоков, требующих применения высокоомных полупроводников (с малой темновой проводимостью) и соответственно имеющих низкие значения фототока, недостаточных во многих случаях для удовлетворительной регистрации применяемые в настоящее время средствами. В целом критическое рассмотрение существующих ионизационных систем показывает, что заложенные в них возможности еще далеко не исчерпаны.

Цель настоящей работы состоит в рассмотрении возможностей получения эффектов усиления в плазме, управляемой освещенным полупроводником.

Уникальные свойства ионизационных фотографических систем и преобразователей изображений с помощью плазмы газового разряда заключаются в том, что светочувствительная полупроводниковая пластина, выступающая в роли одного из электродов газоразрядного промежутка, управляет плотностью тока разряда в плоскости электродов в соответствии с распределением интенсивности излучения спроектированного на него изображения и в отличие от газового разряда между металлическими электродами (где наблюдается S-образность ВАХ, связанная со шнурованием тока в условиях неустойчивости одного распределения тока в системе с отрицательным дифференциальным сопротивлением) подавляет нежелательную для работы системы неустойчивость однородного распределения тока. Подавление неустойчивости в системе “полупроводник-газовый промежуток” осуществляется за счет значительного сопротивления полупроводниковой пластинки, являющейся распределенной нагрузкой. Как показано в работе [2], в широком интервале тока дифференциальное сопротивление системы “полупроводник-газоразрядный промежуток” совпадает с сопротивлением использованного полупроводникового фотоприемника (ФП), и в после пробной области дифференциальное сопротивление разрядного промежутка обращается в нуль, т.к. ВАХ газоразрядного зазора вертикальна. Как уже указывалось, ток в системе полностью контролируется ФП и наблюдаемое усиление по мощности определяется как фотоэлектрическими свойствами полупроводника, так и величиной напряжения разряда. Запись изображения осуществляется в конечном итоге за счет выделения энергии в газоразрядном промежутке при протекании в нем тока.

Но в силу того, что для подавления неустойчивости однородного распределения тока в плазме используются достаточно высокоомные ФП, выделение в разряде значительной мощности затруднено ограничением тока. Эту проблему, по всей видимости,

можно решить двумя путями: или подбором параметров разрядного промежутка и условий разряда, или воздействием на разряд дополнительным источником питания с помощью электрода, введенного в разрядный промежуток. Первый путь отпадает, поскольку это приводит в конечном итоге к ухудшению разрешающей способности и контрастности системы, а чрезмерное повышение питающего напряжения – к образованию шнуров и тем самым к преждевременному выходу из строя ФП. Второй путь, казалось бы, приведет к неизбежной неустойчивости плотности тока. Однако предварительные опыты показали, что при определенных условиях введения в разрядный промежуток дополнительного электрода в виде сетки, подключенного к источнику питания, сохраняет работоспособность системы и, кроме того, приводит к заметному токовому усилению в плазме.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для объяснения наблюдаемого эффекта нами были исследованы несколько вариантов фотосъемочных устройств с сеточным усилением тока в разряде как растрированного, так и не растрированного изображений. Более детально была исследована система в преобразовательном режиме с одним электродом без растрирования изображения, принципиальная схема, которой показана на рис. 1.

В зазоре между ФП и регистрирующей частью (экраном) с помощью калиброванных

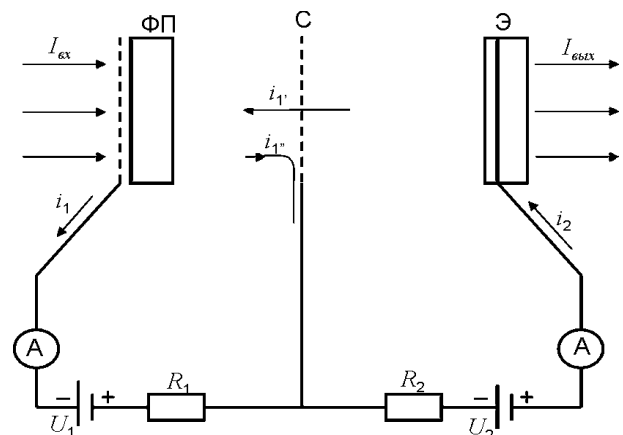


Рис. 1. Принципиальная схема ионизационного преобразователя изображений с сеточным усилением тока в плазме газового разряда. ФП – фотоприемник, С – сетка, Э – экран, R_1 , R_2 – балластные сопротивления.

слюдяных прокладок помещался электрод в виде плоской металлической сетки, имеющей достаточно мелкую структуру (10 ячеек на 1 мм). Между прозрачным электродом, ФП и сеткой подключался основной источник питания U_1 , а между сеткой и экраном – вспомогательный источник U_2 . Для выявления влияния параметров газоразрядного промежутка на фотоэлектрические свойства системы и определения предельных возможностей предусматривалось изменение давления газа и величины зазора между сеткой и экраном.

По всей видимости, усиление по току в газоразрядном промежутке будет происходить следующим образом. Если спроектировать изображение на поверхность полупроводникового фотоприемника и приложить к его прозрачному электроду и сетке достаточное напряжение ($U \gg U_{np}$ для газового промежутка), то в цепи сетки установится самостоятельный тихий разряд, интенсивность которого в поперечном сечении будет контролироваться фотоприемником в соответствии со спроектированным изображением. Поскольку высокоэнергичные компоненты ионизированного газа могут проскакивать сквозь сетку, то его можно рассматривать как источник начальной ионизации для участка “сетка-экран”. При наличии ускоряющего поля частицы приобретут кинетическую энергию, достаточную для интенсивной ударной ионизации, что приведет к зажиганию разряда в цепи экрана, плотность тока которого будет зависеть от интенсивности разряда в первом зазоре. Таким образом, небольшим током сетки, лимитирующимся фотоприемником, можно управлять при зажигании разряда значительным током в цепи экрана.

Кроме того, включение дополнительного электрода в разрядном промежутке можно характеризовать следующим:

1. Устраняется явление статистического запаздывания зажигания разряда во время экспонирования, что существенно сокращает инерционность системы.

2. Создается возможность значительного понижения рабочего напряжения на ФП, поскольку взаимное влияние разряда второй цепи на разряд в первом зазоре способствует снижению напряжения зажигания в цепи ФП.

Для объяснения закономерностей формирования изображения в ионизационных системах с токовым усилением в разряде и определения оптимальных режимов эксплуатации был проведен ряд исследований вольт-амперных и люкс-амперных характеристик (ВАХ, ЛАХ) системы в целом и отдельных ее элементов. Также были проведены цикл исследований для изучения влияния параметров газоразрядных промежутков и режиме питания на интенсивность свечения экрана и преобразовательные характеристики системы. Были рассмотрены токовые зависимости цепи экрана от тока сетки и исследован коэффициент токового усиления системы $K = i_2/i_1$ (где i_1 – ток сетки, i_2 – ток экрана) в разных режимах.

Исследования проводились как в режиме постоянных токов, так и в импульсивном режиме. Основная часть результатов была измерена при непосредственном визуальном контроле однородности распределения тока по площади разряда и качества изображения с помощью люминесцентного экрана.

В качестве ФП использовался GaAs $\rho = 10^7 \div 10^9$ Ом·см, при освещении в спектральной области длин волн больше 1 мкм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения свойства системы рассматривались две вольт-амперные характеристики: участков “ФП-сетка” и “сетка-экран”. На рис. 2, 3 показаны соответственно семейство

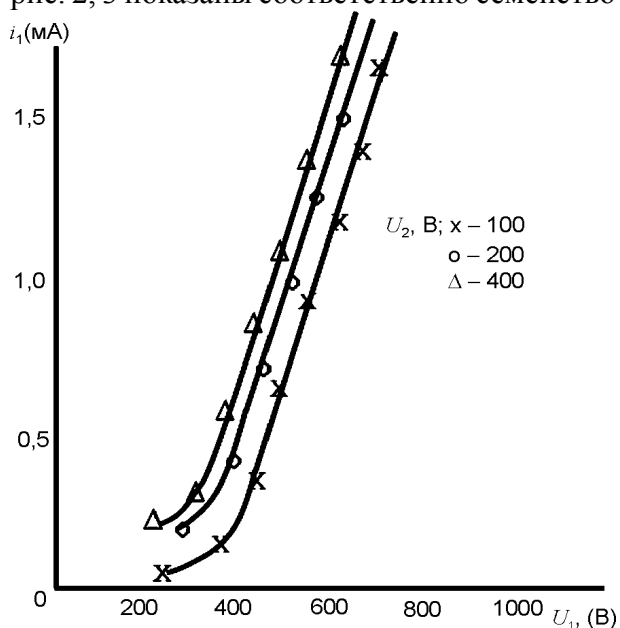


Рис. 2. ВАХ участка ФП-сетка.

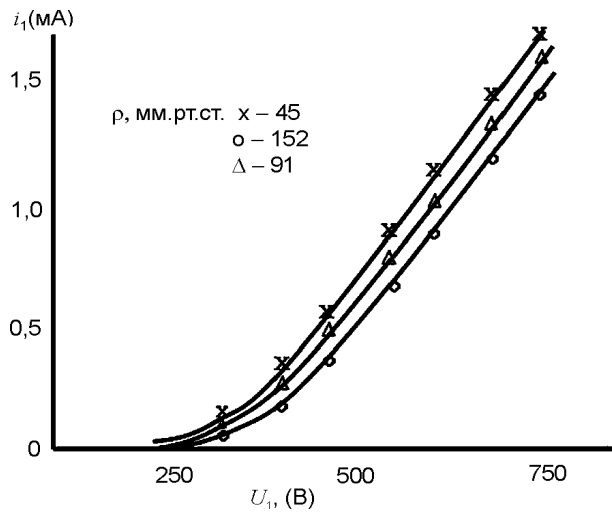


Рис. 3. ВАХ участка ФП-сетка $U_2 = 300$ В.

ВАХ участка “ФП-сетка” для постоянных величин давления газа ($\rho = 15$ мм.рт.ст.) и длины разрядного промежутка ($d_1 = 50$ мкм) при различных напряжениях на участке “сетка-экран” и семейство ВАХ, когда параметром кривых является давление газа при $U_2 = 300$ В.

Видим типичные для ионизационных систем ВАХ, когда изменение параметров газоразрядного промежутка (в данном случае давление) приводит к изменению падения напряжения на газовом зазоре. Отличительной особенностью системы с сеточным управлением является то, что после зажигания разряда в цепи экрана характеристика сдвигается в сторону меньших напряжений, и чем интенсивнее этот разряд, тем меньше падение напряжения на участке “ФП-сетка”. Последнее обстоятельство объясняется тем, что сетка приобретает потенциал, обусловленный током зарядов положительных ионов плазмы участка “сетка-экран”.

Семейство вольт-амперных характеристик для участка сетка-экран (см. рис. 4, 5) показывает зависимость тока от напряжения при фиксированных значениях тока в цепи “ФП-сетка” и различных давлениях газа. Из характеристик следует, что в исследованном диапазоне токов отсутствует характерная для газового разряда между металлическими электродами неустойчивость тока, хотя ее значения в данном случае соответствует токам в диапазонах нормального U аномального тлеющего разряда, что специально контролировалось равномерностью свечения экрана. Зависимо-

сти $i_2(U_2)$ (рис. 4) сняты для тока $i_1 = 15$ мА, входной интенсивности $\partial_{bx} = 10^{-3}$ Вт/см² и для толщины газоразрядных зазоров $d_1 = 50$ мкм и $d_2 = 160$ мкм, когда параметром является давление газа.

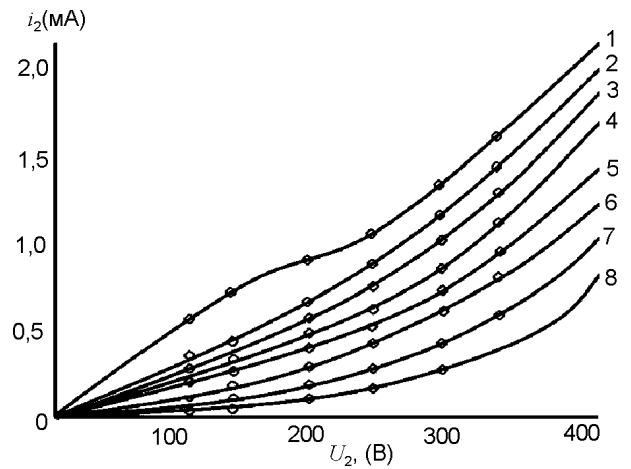


Рис. 4. ВАХ участка сетка-экран. $I_1 = 1,5$. Экран ρ , мм.рт.ст. 1 – 15; 2 – 30; 3 – 45; 4 – 61; 5 – 76; 6 – 91; 7 – 121; 8 – 150.

В общем случае кривые $i_2(U_2)$ имеют весьма сложный и неоднозначный характер, для объяснения которых необходимо учитывать ряд факторов, определяющих прохождение тока в цепи экрана. Этими факторами могут быть: экранирующее поле объемного заряда, образованного в приэлектродном пространстве, изменение средней длины пробега носителей с изменением давления газа, процессы во втором газоразрядном промежутке, определяющиеся упругими и неупругими соударениями частиц, и так далее. На графиках можно выделить два характерных участка с переходом от сверхлинейного к линейному нарастанию тока. Уменьшение давления газа приводит к веерообразному смещению кривых первого и параллельному сдвигу второго участков в сторону больших токов. Характерным для первого участка является меньший наклон и наличие значительного тока при нулевом напряжении между сеткой и экраном, который с уменьшением давления растет. Далее характерным для этих графиков является и то что с увеличением давления переход от первого участка ко второму происходит при больших U_2 , а на линейном уменьшение приводит к пропорциональному росту (см. рис. 6)

На рис. 5 показано семейство ВАХ разряда между сеткой и экраном при фиксированном давлении $p = 15$ мм.рт.ст. и разных значениях тока в цепи ФП. Видим сходие с характеристиками рис. 4 зависимости $i_2(U_2)$. Аналогично тому, что уменьшение давления приводит к сдвигу характеристик в сторону больших токов, увеличение тока также приводит к увеличению тока i_2 .

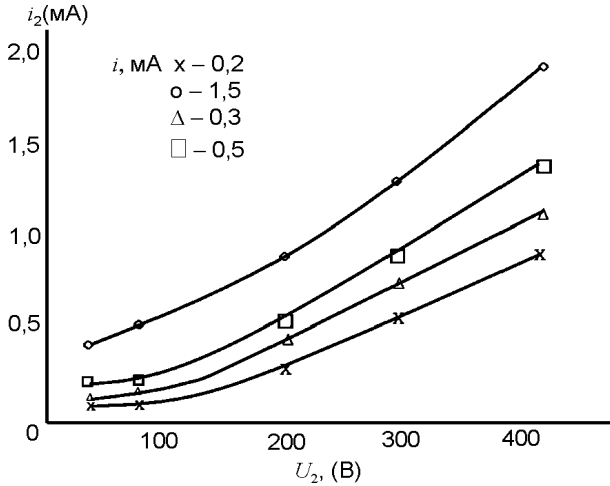


Рис. 5. ВАХ участка “сетка-экран”.

Однако в отличие от зависимости $i_2(p)$ (рис. 6) в данном случае наблюдается тенден-

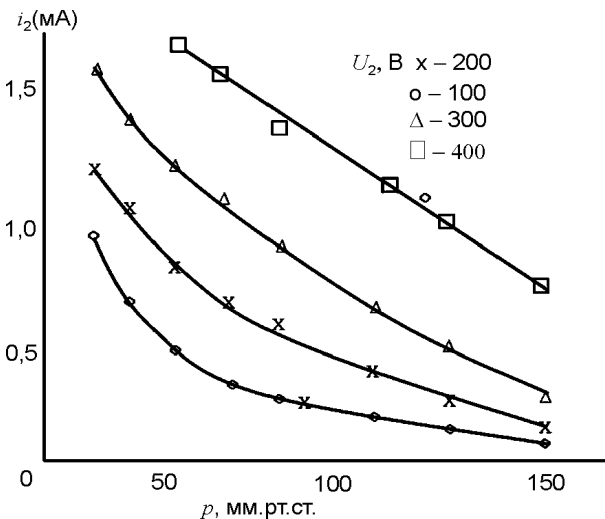


Рис. 6. Семейство зависимостей $i_2(p)$, перестроенных из ВАХ (рис. 4).

ция насыщения тока i_1 (рис. 7).

Если сравнить семейства характеристик $i_2(U_2)$ с $i_2(p)$ при фиксированном токе i_1 для разных p и U_2 соответственно (см. рис. 4, 6) и характеристики $i_2(i_1)$ для разных U_2 и p при фиксированном p и U_2 соответственно (рис. 7, 8), то можно заметить аналогию и сделать вывод о том, что в общем случае ток в цепи

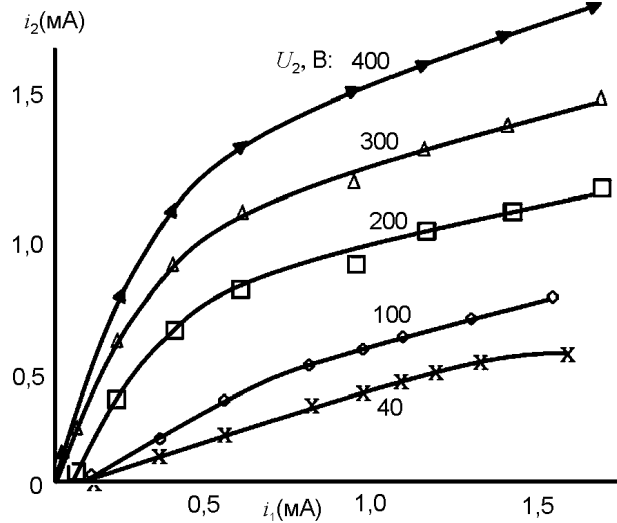


Рис. 7. Семейство ток-токовых характеристик $i_2 = f(i_1)$. Ток в цепи ФП изменялся регулированием напряжения.

“сетка-ФП” пропорционален величине E/p , которая характеризует энергию накапливаемую электроном на пути свободного пробега, и определяет степень ионизации газа [5].

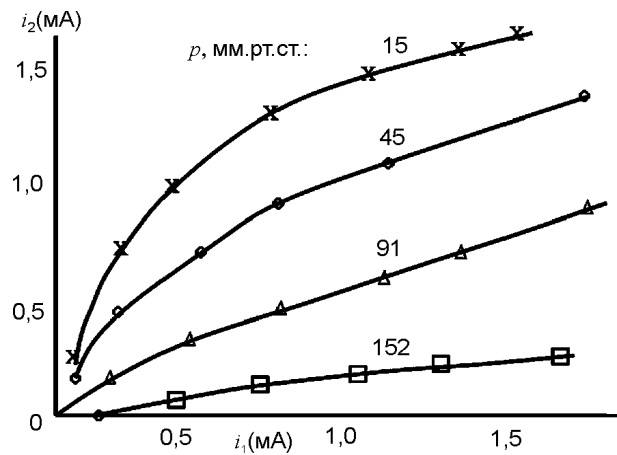


Рис. 8. $i_2(i_1)$ характеристики $U_2 = 300$ В.

Нами были исследованы также возможности работы системы в импульсном режиме. Проведенные исследования импульсивных свойств в различных режимах показали, что эти свойства зависят от амплитуды и длительности импульсов, параметров разрядного промежутка и от величины тока i_1 . Увеличение p и d приводит к повышению амплитуды импульса и к запаздыванию развития разряда. Наличие тока в цепи ФП значительно сокращает время формирования разряда и уменьшает амплитуду импульса. На рис. 9 показаны ВАХ участка “сетка-экран”, измеренные по схеме, показанной на рис. 10. Длитель-

ность импульса составляла $2,75 \cdot 10^{-3}$ сек, давление $p = 75$ мм.рт.ст., зазор $d_2 = 100$ мкм. Кривые сняты для трех токов в цепи ФП.

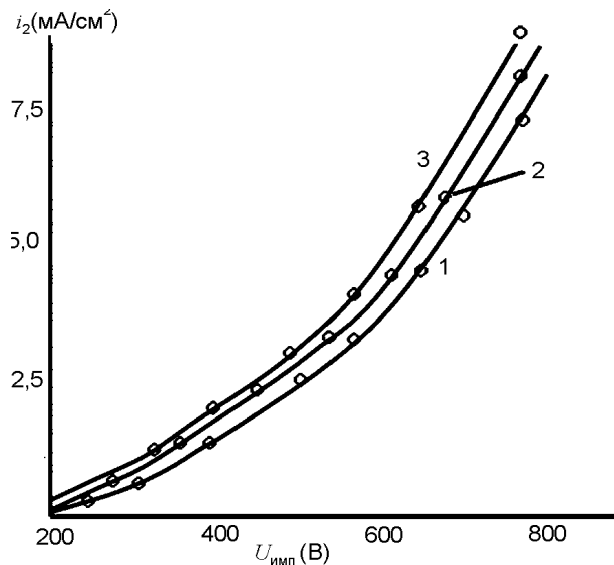


Рис. 9. ВАХ в импульсном режиме $\tau_{\text{имп}} = 2,75 \cdot 10^{-3}$ сек: 1 — $U = 600$ В, $i_1 = 60$ мА; 2 — $U = 800$ В, $i_1 = 93$ мА; 3 — $U = 1000$ В, $i_1 = 145$ мА.

Было замечено, что изменение тока i_1 от 60 до 140 мкА приводит к уменьшению времени развития разряда во втором зазоре с 0,2 до $0,1 \cdot 10^{-3}$ сек. По форме кривые несколько схожи с кривыми для постоянного тока, только в импульсивном режиме наблюдается некоторое смещение ВАХ в сторону больших U_2 . При этом отсутствие шнурования тока в цепи второго разрядного промежутка контролировалось равномерностью свечения люминисцентного экрана и видом осциллограммы тока, которая при наличии неустойчивости распределения плотности тока имела вид колебательного характера. Отметим, что максимальный коэффициент усиления по току был ≈ 20 , когда в режиме постоянного тока предельно достигнутое значение усиления составляло $\approx 6 + 8$.

Анализ результатов исследований электрических свойств газоразрядного промежутка, заключенного между сеткой и экраном, позволяет сделать следующие выводы. Поскольку горячие электроны плазмы первого разрядного промежутка, имеющие избыточный над равновесным значением импульс, направленный перпендикулярно к поверхности анода (сетки), могут инжектироваться сквозь сетку во второй промежуток, то процессы, про-

исходящие в этом зазоре, должны определенным образом зависеть от разрядного тока в цепи ФП. При этом существенное влияние будут оказывать также объемный заряд присутствующего пространства и средняя длина пробега носителей, определяемая давлением газа в зазорах. Наблюдаемый в опытах значительный ток короткого замыкания в цепи экрана позволяет говорить о том, что плазма газового разряда, заключенная между ФП и сеткой, является мощным поставщиком электронов в заэлектродное пространство, при этом плотность потока инжектированных электронов растет с уменьшением давления газа (рис. 4).

Увеличение тока в цепи ФП должно было бы привести к экспоненциальному росту тока i_2 , что не наблюдается на опытах (рис. 7, 8). Это объясняется тем, что повышение тока i_1 влечет за собой образование отрицательного объемного заряда в проэлектродном пространстве, который экранирует движение электронов, что отражается в сублинейной зависимости $i_2(i_1)$. Уменьшение давления газа увеличивает среднюю длину пробега носителей, тем самым большее число электронов успевает преодолеть поле объемного заряда, впоследствии они вытлкиваются тем же полем в засеточное пространство, где могут вызвать ионизацию или возбуждение атомов газа. Поэтому при малых напряжениях с уменьшением p наблюдается увеличение крутизны ВАХ (см. рис. 4).

При наличии достаточного ускоряющего поля между сеткой и экраном происходит интенсивная ударная ионизация атомов и молекул газа, что способствует резкому возрастанию тока в цепи экрана (второй участок на рис. 4). По описанию выше причинам при низких давлениях переход от участка с меньшим наклоном может и не наблюдаться, поскольку интенсивная ионизация наступает уже и при незначительных напряжениях (см. кривые 1, 2 рис. 4). Дальнейший ход кривых $i_2(i_1)$ характеризуется тенденцией к насыщению тока i_2 , что говорит о возрастающей роли при электродного отрицательного объемного заряда. Это можно лишней раз подтвердить сравнением кривых $i_2(i_1)$ (рис. 7, 11), полученных для $U_2 = 300$ В и $p = 15$ мм.рт.ст. В первом

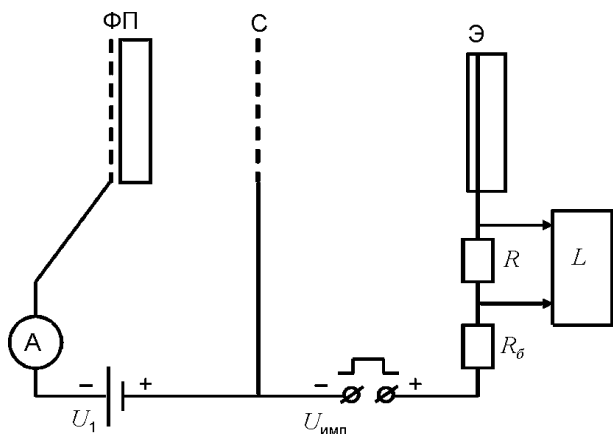


Рис. 10. Принципиальная схема ионизационной системы с токовым усилением для исследования импульсного режима, L – осциллограф, R_b – балластное сопротивление.

случае ток в цепи ФП изменялся изменением напряжения U_1 , и за счет частичной компенсации объемного заряда потенциалом анода нарастание тока i_2 замедляется при больших i_1 . Во втором случае при постоянном U_1 ток i_2 регулируется изменением освещения ФП, тем самым объемный заряд приэлектродного пространства все время увеличивается с ростом i_1 , и на графике мы наблюдаем ранний изгиб характеристики $i_2(i_1)$ и уменьшение тока в цепи экрана.

Наиболее полную информацию об электрических свойствах газоразрядных промежутков дает семейство зависимостей коэффициента токового усиления $K = i_2/i_1$ от тока в цепи ФП.

На рис. 11 показаны эти характеристики, снятые при фиксированном давлении газа и разных значениях напряжения U_2 . Максимальный коэффициент усиления достигается при малых значениях тока и больших значениях напряжения i_1 . При незначительных напряжениях U_2 (кривые 1, 2) вид кривых указывает о возрастающей роли приэлектродного отрицательного объемного заряда на интенсивность проникновения электронов из-за сеточного пространства, при этом значительная ударная ионизация во втором разрядном промежутке (на наличие ионизация указывает смещение кривых при увеличении U_2) не в состоянии исказить распределение потенциала на этом участке. Поэтому при больших i_1 ток экрана определяется только инжекционными

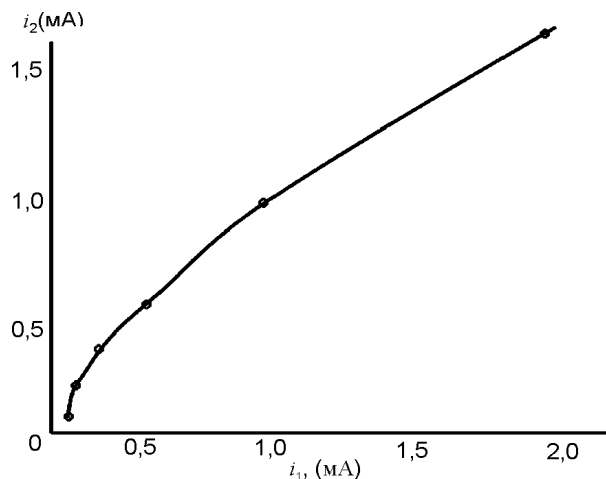


Рис. 11. $i_2(i_1)$ – характеристики. (i_1 – является функцией выходного освещения).

свойствами первого разрядного промежутка, имеющего прозрачный электрод, что характеризуется пропорциональным ростом тока, т.е. постоянством коэффициента усиления при токах $i_2 \geq 0,5$ мА. При дальнейшем увеличении напряжения U_2 (см. кривые 4, 5) наблюдаем монотонное убывание коэффициента усиления; при этом разряд характеризуется интенсивным размножением носителей тока, и поскольку скорости дрейфа электронов и положительных ионов сильно отличаются, то вблизи сетки (катода) положительные ионы образуют пространственный положительный заряд, который по мере увеличения приэлектродного отрицательного объемного заряда компенсирует поток малоэнергичных электронов из первого разрядного промежутка. Кроме того, при образовании положительного внеэлектродного пространственного заряда процессы ударной ионизации и возбуждения нейтральных атомов становятся менее эффективными. Вышеуказанными причинами и объясняется более медленный, по сравнению с током ФП, рост тока i_2 .

В процессе опытов мы наблюдали некоторую особенность работы системы, которая является, на наш взгляд, важным обстоятельством работоспособности ионизационной системы с токовым усилением в газовом разряде. При напряжении $U_2 \geq 300$ снятие входного сигнала (света) или напряжения между ФП и сеткой приводит к неустойчивости токового состояния между сеткой и экраном, которая характеризовалась образованием шнуров, на-

блюдаемых визуально на люминисцентном экране. А ВАХ приобретает характерный для газового разряда между металлическими электродами S-образный участок.

Таким образом, мы имеем случай, когда газовый разряд между ФП и прозрачным для зарядов (электронов) электродом управляет разрядом во внеэлектродном пространстве, заключенном между сеткой и вторым электродом (экраном), и подавляет нежелательную для работы системы неустойчивость токового состояния. На наш взгляд, поток электродов из первого разрядного промежутка нейтрализует вблизи катода положительный пространственный заряд, следствием которого является однородное распределение потенциала по длине разрядного промежутка, что препятствует в рассматриваемом диапазоне на-

пряжения U_2 развитию самостоятельного газового разряда.

Таким образом, в первом приближении в данном случае мы можем говорить о несамостоятельном газовом разряде, который при выключении мощного внешнего ионизатора может перейти в самостоятельный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касымов Ш.С., Парицкий Л.Г., Рывкин С.М. //ФТП. – 1974. – Т. 8. – С. 819.
2. Астров А.Ю., Касымов Ш.С., Парицкий Л.Г. //ФТП. – 1975. – Т. 9. – С. 1844.
3. Астров А.Ю., Касымов Ш.С., Парицкий Л.Г., Рывкин С.М.//ФТП. – 1975. – Т. 9. – С. 1844.
4. Парицкий Л.Г., Касымов Ш.С.//Авторское свидетельство № 497899, 1975.