

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННОГО КОНТАКТА ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ РАЗРЯДА В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Хайдаров З¹., Хайдаров Б. З².

¹Ферганский государственный университет

²Ферганский политехнический институт

АННОТАЦИЯ

Теоретически и экспериментально изучены физические явления в газоразрядной ячейке с полупроводниковыми электродами из полуизолирующего арсенида галлия и кремния, легированного серой. Показано, что плазменные контакты к полупроводниковым электродам положительно влияют на стабильность свечения газового разряда при выбранных условиях. Компенсированный хромом арсенид галлий с двумя плазменными контактами стабилизирует работы преобразователя изображений в широком интервале рабочих температур и длин волн. Экспериментально подтверждается, что на основе газоразрядной ячейки с дополнительной демпфирующей ячейкой полупроводниковая фотографическая ионизационная камера обеспечивает фотографирование объектов в области ИК-излучений от 0,38 мкм до 11 мкм и далее. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: *газоразрядная ячейка, демпфирующая ячейка, арсенид галлий, кремний, легированного серой, полупроводниковая фотографическая ионизационная камера, инфракрасное излучение, фотоэлектрический гистерезис, фотографический эффект.*

ABSTRACT

Physical phenomena in a gas-discharge cell with semiconductor electrodes made of semi-insulating gallium arsenide and silicon doped with sulfur have been theoretically and experimentally studied. It is shown that plasma contacts to semiconductor electrodes have a positive effect on the stability of the gas discharge glow under the chosen conditions. Chromium-compensated gallium arsenide with two plasma contacts stabilizes the operation of the image converter over a wide range of operating temperatures and wavelengths. It is experimentally confirmed that on the basis of a gas-discharge cell with an additional damping cell, a semiconductor photographic ionization chamber provides photographing of objects in the IR radiation region from 0.38 μm to 11 μm and beyond. The experimental results agree satisfactorily with theoretical calculations.

Keywords: *gas discharge cell, damping cell, gallium arsenide, silicon doped with sulfur, semiconductor photographic ionization chamber, infrared radiation, photoelectric hysteresis, photographic effect.*

ВВЕДЕНИЕ

Плоская газоразрядная ячейка с полупроводниковым фоточувствительным электродом является основным элементом в полупроводниковой фотографической ионизационной камере (ПФИК). Она нашла достаточно широкое применение в области фотоэлектроники при регистрации видимого и инфракрасного (ИК) излучений, а также тепловых полей объектов [1-3].

Прохождение постоянного тока в такой системе сопровождается рядом своеобразных явлений, приводящих к стабилизации газоразрядного тока, возможности управления величиной последнего и пространственным распределением по сечению разряда путем модуляции проводимости полупроводникового электрода. Многообразие факторов, определяющих полупроводниковую стабилизацию разряда и их нелинейные функциональные связи, делают эту проблему достаточно сложной. Однако, демпфирующие свойства полупроводникового фотоприемника в виде однородного распределенного сопротивления играют особую роль. Только высокоомный электрод в виде однородного распределенного сопротивления обеспечивает стабилизации газового разряда по площади поперечного сечения [4].

В этой работе были исследованы область стабилизации разряда в широкой области давлений газа и сопротивления фотоприемников с полупроводниковыми электродами из арсенида галлия, компенсированного хромом (GaAs) при комнатной температуре и кремния, легированного платиной (Si<Pt>) [5] при температуре жидкого азота. При удельном сопротивлении полупроводника от 10^7 Ом см до $1,3 \times 10^8$ Ом см существует широкая область стабилизации при всех исследованных значениях давления газа, включая атмосферное. Кроме того, было установлено, что при удельном сопротивлении полупроводника ниже 10^6 Ом·см стабилизация разряда в газоразрядной ячейке не наступает. По этой причине полупроводниковая пластина из кремния, легированная серой (Si<S>) [6] не может, использована в качестве фотоприемника в газоразрядной ячейке при постоянном токе, то есть в ждущем режиме, поскольку, даже при температуре жидкого азота его удельное сопротивление составляет не выше 10^6 Ом см. Поэтому она используется в импульсном, то есть в стробирующем режиме. Однако, стробирующий режим в ПФИК не отвечает современным требованиям при ИК-фотографировании с

подобными фотоприемниками типа Si<S> для длинноволновой области спектра. Во-первых, требуется мощный не менее 300 ваттный, по крайней мере, импульсный генератор. Во-вторых, равновесные носители разряда в газоразрядной ячейке при импульсном режиме создает сильный фон, поскольку напряженность поля в ней составляет не менее 10^8 В/см. Это препятствует обеспечения контрастного ИК-изображения. Однако, полупроводниковая пластина из Si<S> обеспечивает фотографическую регистрацию и пространственную диагностику лазерных излучений до 11 мкм [7 – 9].

Целью настоящей работы является создание условия – стабильного свечения газового разряда при постоянном токе, то есть в ждущем режиме работы газоразрядной ячейки ПФИК и тем самым, обеспечения фотографической регистрации в далекой инфракрасной области спектра.

Ниже приводятся результаты исследования при стабилизации разряда в газоразрядной ячейке с электродами из Si<S> и GaAs с плазменными контактами, в обсуждении сопоставляются теоретические и экспериментальные результаты. Мы данной работе использовали богатый опыт исследования плазменных контактов на основе полуизолирующего арсениде галлия [10-12].

Экспериментальная установка и методика исследования

Конструкционная схема ПФИК показана на рис.1,а. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – полупроводниковый фотоприемник, 2 – газоразрядный промежуток, 3 – прозрачный контрэлектрод, 4 – волоконно-оптический элемент, 5 – газонаполняемая камера, 6 – входное окно газонаполняемой камеры, 7 – выходное окно газонаполняемой камеры, 8 – узел откачки и напуска газа, 9 – сосуд Дьюара, 10 – полый кольцевой охладитель, 11 – вакуумированный кожух кольцевого охладителя, 12 – вакуумный объем сосуда Дьюара, 13 – вакуумный узел сосуда Дьюара для откачки воздуха, 14 – входное окно вакуумированного кожуха, 15 – крышка вакуумированного кожуха.

Основная часть ПФИК является газоразрядная ячейка, которая состоит из фотоприемника 1 и контрэлектрода 3. Контрэлектрод изготавливается из волоконно-оптической шайбы с проводящим прозрачным покрытием из SnO_2 . При проецировании на поверхность фотоприемника 1 инфракрасного (ИК) изображения объекта, в нем возникает распределение фотопроводимости, повторяющегося интенсивности падающего ИК излучения. При приложении между фотоприемником 1 и прозрачным контрэлектродом 3 достаточного по величине напряжения происходит пробой газоразрядного промежутка 2.

Плотности тока и яркости свечения газоразрядной плазмы будет определяться распределением фотопроводимости полупроводникового фотоприемника 1. Изображение через контрэлектрод 3 передается в виде видимого и ультрафиолетового излучения на выход устройства с помощью волоконно-оптического элемента 4. Торец волоконно-оптического элемента 4 стыкуется с входом электронно-оптического преобразователя – ЭП-16 (производство России).

На опыте фотографируемым и наблюдаемым объектом являлась щель ИК-монохроматора с призмой NaCl и источником света типа «глобар» с ферритовым стержнем. Изображение щели проектировалось линзой из BaF₂ на приемную поверхность фотоприемника. Интенсивность излучения была измерена термостолбиком типа ЛЭТИ с чувствительностью 0,72 В/Вт.

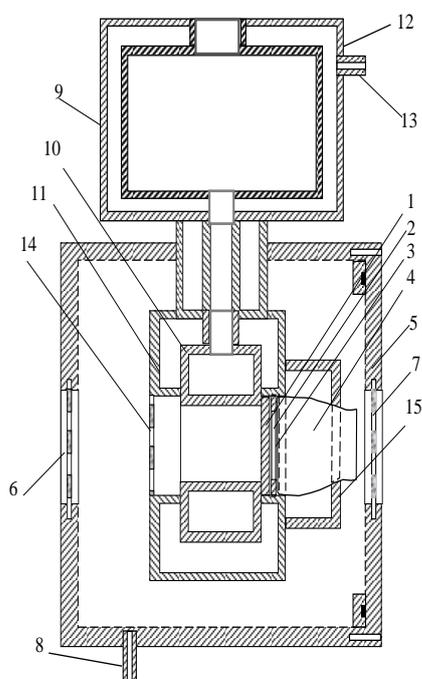


Рис. 1, а. Конструкция (схематически) полупроводниковой фотографической ионизационной камеры.

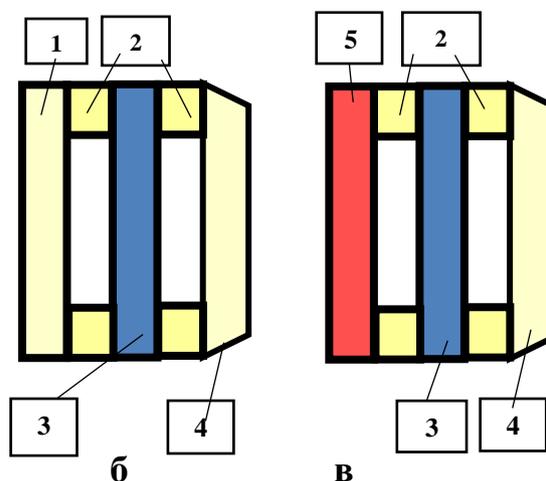


Рис.1,б. Газоразрядная ячейка с фотоприемником из GaAs, рис.1,в - с фотоприемником из Si<S> и демпфирующим электродом из GaAs. 1 – входной электрод из стекла со SnO₂; 2 – слюдяные пластинки с отверстиями в центре; 3 – GaAs; 4 – волоконно-оптическая шайба со SnO₂; 5 – фотоприемник из Si<S>.

Опыты, проводились для двух видов конфигурации полупроводников и прозрачных контрэлектродов. Как видно из рис.1,б в первом виде конфигурации, полупроводниковая пластина 3 из арсенида галлия, компенсированного хромом (GaAs) расположена между стеклянной пластинкой 1 и волоконно-оптической шайбой 4 с проводящими покрытиями из SnO₂, при этом полупроводниковая пластина отделена от 1 и 4, газовыми зазорами 2 толщиной до 100 мкм каждый. В этом случае эксперимент проводился при комнатной температуре с освещением белого света.

Во втором виде конфигурации электродов (рис.1,в), чувствительный к инфракрасному излучению фотоприемник из Si<S> был установлен на входной части газоразрядной ячейки. Омический контакт на приемной поверхности кремния создавался слоем фосфора методом термодиффузии с концентрацией $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ толщиной 8 мкм и напыленный в вакууме по краям кольцо из золота. Внутренняя поверхность фотоприемника из Si<S> отделена от демпфирующей пластины из GaAs через газовый зазор толщиной до 100 мкм, а вторая поверхность GaAs – от волоконно-оптической шайбы, тоже через газовый зазор с такой же толщиной. В этом случае эксперимент осуществлялся при температуре термоэлектрического охладителя с инфракрасным излучением ИК-монохроматора.

Вольтамперные и релаксационные кривые газоразрядной ячейки сняты на двухкоординатном потенциометре типа ЛКД4-003. Для построения характеристических кривых был использован фотоэлектрический умножитель (ФЭУ-19А), в котором зафиксированы величины токов, соответствующих свечению газового разряда. При этом свечение разряда направляется на ФЭУ непосредственно с выходного торца волоконно-оптической шайбы газоразрядной ячейки или с экрана ЭП-16.

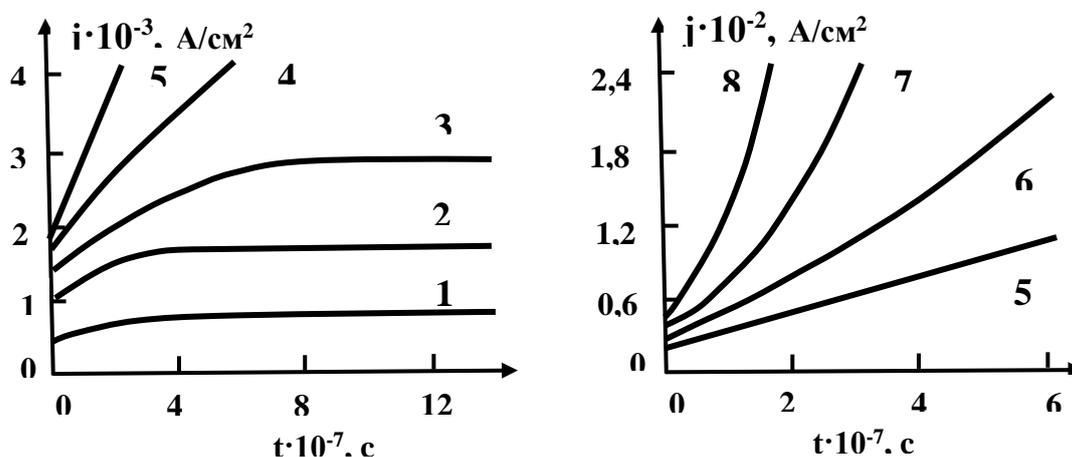


Рис. 2. Кинетика фототока при различных значениях напряженности электрического поля E .

E равно: 1 – $0,4 \times 10^4 \text{ В/см}$, 2 – $0,9 \times 10^4$, 3 – $1,3 \times 10^4$, 4 – $1,6 \times 10^4$, 5 – 2×10^4 , 6 – $2,25 \times 10^4$, 7 – 3×10^4 , 8 – $5 \times 10^4 \text{ В/см}$. Интенсивность генерации $F = 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Кривая 5 соответствует бесконечному эффективному времени жизни.

Теория

Плазменные контакты в газоразрядной ячейке оказывает особые воздействия на поверхность полупроводника. Воздействие носителей тока плазмы (электроны и ионы), а также поток фотонов создаваемые тормозным излучением электронов на поверхности полупроводника совместно со

свечением газового разряда распространяется на всю глубину полупроводника. При таком представлении носители вызывает однородную объемную генерацию, пропорциональную фототоку j_C , а также потоку фотоэлектронов $I = j/e = \xi\mu nE$, где μ – подвижность носителей в полупроводнике, n – концентрация фотоносителей, E – напряженность электрического поля, ξ – коэффициент пропорциональности, физический смысл которого будет пояснен ниже.

Изменение концентрации неравновесных носителей n во времени с учетом воздействия газоразрядной плазмы описывается уравнением

$$\frac{dn}{dt} = F - \frac{n}{\tau} + \xi\mu nE, \quad (1)$$

где F – интенсивность оптической генерации, τ – время жизни неравновесных носителей. Изменение тока газоразрядной ячейки j после включения напряжения определяется выражением в области $E < 1/\xi\mu\tau$

$$j = \frac{\xi\mu EF}{\frac{1}{\tau} - \xi\mu E} \left\{ 1 - \xi\mu E \tau \exp \left[-t \left(\frac{1}{\tau} - \xi\mu E \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

а в области $E > 1/\xi\mu\tau$ – выражением

$$j = \frac{\xi\mu EF}{\frac{1}{\tau} - \xi\mu E} \left\{ -\xi\mu E \tau \exp \left[-t \left(\frac{1}{\tau} - \xi\mu E \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

На рис.2 показаны релаксационные кривые фототока, при различных значениях приложенного напряжения, рассчитанные по формулам (2) и (3). На рис. 3 – серия релаксационных кривых фототока при различных значениях интенсивности света рассчитанные, так же по формулам (2) и (3).

Экспериментальные результаты

Релаксационные кривые были сняты для GaAs с двумя плазменными контактами в газоразрядной ячейке с конфигурацией электродов, показанной на рис. 1, б. На рис. 4, а приведена серия релаксационных кривых для различных значений приложенного напряжения, а на рис. 4, б – для различных значений освещенности полупроводника с белым светом.

Были исследованы характеристики газоразрядной ячейки с двумя полупроводниковыми электродами – Si<S> и GaAs. Они устанавливались согласно конфигурации электродов показанной на рис.1, в. В такой конфигурации GaAs играет роль демпфера (стабилизирует горения разряда по поперечному сечению), а Si<S> обеспечивает фотографическую чувствительность по инфракрасному излучению с длиной волны до 11 мкм [7].

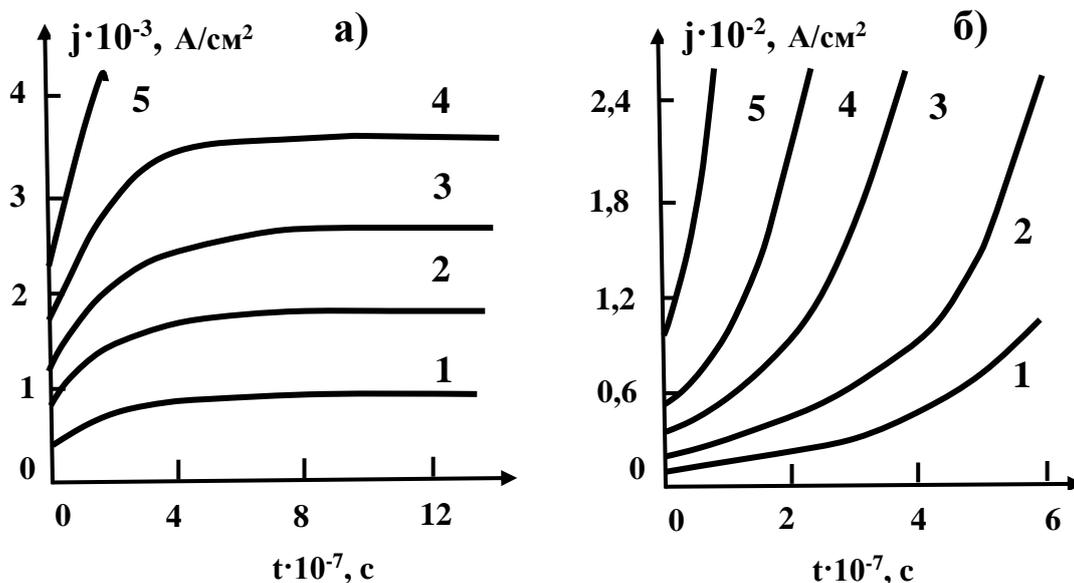


Рис. 3. Кинетика фототока при различных значениях интенсивности оптического возбуждения F . F равно: а) 1 – $0,6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, 2 – 10^{16} , 3 – $1,5 \times 10^{16}$, 4 – 2×10^{16} , 5 – $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ при напряженности поля $E = 10^4 \text{ В/см}$; б) 1 – $0,8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, 2 – $0,2 \times 10^{16}$, 3 – 10^{16} , 4 – 2×10^{16} , 5 – $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ при напряженности поля $E = 3 \times 10^4 \text{ В/см}$.

Вольтамперные характеристики газоразрядной ячейки приведены на рис.5, причем при различных скоростях подачи напряжения (рис.5, а), с различными значениями удельного сопротивления демпфирующего электрода из GaAs при постоянной скорости подачи напряжения (рис.5, б), и для различных значений интенсивности ИК-излучения (рис. 6) при постоянной скорости подачи напряжения.

На рис. 7 приведены характеристические кривые газоразрядной ячейки (зависимости тока ФЭУ от экспозиции $H = I/S = I/(J \times t)$, где J – интенсивность освещения, t – время экспозиции), согласно конфигурации полупроводников из Si<S> и GaAs, показанной на рис. 1, в, без усиления свечения разряда (кривая 1) и с усилением на ЭП-16 (кривая 2).

Обсуждение результатов и выводы

Из теоретических расчет следует (рис. 2), что стационарное значение концентрации неравновесных носителей n резко возрастает (кривая 5) и обращается в бесконечность при $\xi \mu E \rightarrow 1/\tau$. Из этого условия можно выяснить физический смысл коэффициента ξ . Обозначим $\lambda = 1/\xi$ – некоторая эффективная длина, характерная для возбуждающего действия плазменного потока на полупроводник. Тогда условие $\xi \mu E \rightarrow 1/\tau$ можно переписать в виде $t = \lambda/\mu E = \tau$ или $\lambda = \mu E \tau$. Наибольший эффект воздействия плазменного возбуждения имеет место в том случае, когда длина дрейфового смещения носителей в полупроводнике $L_E = \mu E \tau$ становится равной λ . Иначе говоря, когда

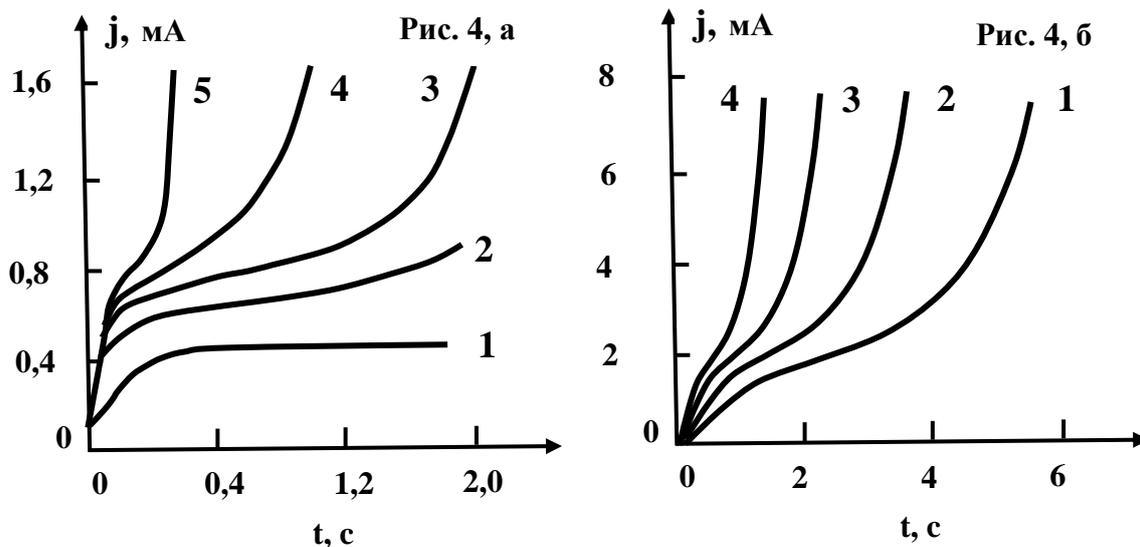


Рис. 4, а. Кинетика фототока для различных значений приложенного напряжения на газоразрядной ячейке при постоянной интенсивности освещения ($4 \times 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$).

Напряжение равно: 1 – 2 кВ; 2 – 2,7 кВ; 3 – 2,9 кВ; 4 – 3 кВ; 5 – 3,05 кВ.

Рис. 4, б. Кинетика фототока для различных значений интенсивности освещения при постоянном значении напряжения на газоразрядной ячейке (3 кВ).

Интенсивность освещения J равно: 1 - $5 \times 10^{-5} \text{ Вт/см}^2$, 2 - 10^{-4} Вт/см^2 , 3 - $6 \times 10^{-4} \text{ Вт/см}^2$, 4 - $4 \times 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$.

время пролета t_{np} носителем характерной длины λ достигает времени жизни $t_{np} = \tau$ при увеличении напряженности поля. Если ввести время пролета t_{np} носителем всей длины полупроводника L ($t_{np} = L/\mu E$) то тогда, условие $\xi\mu E \rightarrow 1/\tau$ можно записать в виде $\tau = (\lambda / L) \times t_{np}$. Это условие напоминает условие эксклюзии ($\tau = t_{np}$) с тем отличием, что перед t_{np} стоит множитель λ / L – отношение характерной длины к длине образца. Таким образом, λ несомненно, связано с эффективностью воздействия плазмы. На приведенных релаксационных кривых рис. 2 характерно то, что при $E = 1/\xi\mu\tau$ релаксация выражается линейным нарастанием тока с наклоном, соответствующим темпу оптической генерации при отсутствии рекомбинации. В этом случае рекомбинационные потери носителей в точности восполняются генерацией от плазмы и эффективное время жизни $1/\tau_{\text{эф}} = 1/\tau - \xi\mu E$ обращается в бесконечность. В области $E < 1/\xi\mu\tau$, $\tau_{\text{эф}}$ положительно, фототок имеет стационарное значение. При $E > 1/\xi\mu\tau$ реализуется условие отрицательного времени жизни, стационарное состояние отсутствует, имеет место экспоненциальное нарастание фототока во времени.

Как видно из экспериментальных релаксационных кривых на рис. 4 их общий характер в известной мере согласуется с теоретическими расчетами (рис. 2 и 3), в том числе и в области отрицательного времени жизни. Для напряжения 2 кВ наблюдается достижение стационарного состояния, при больших

напряжениях происходит резкое возрастание тока (рис. 4, а). Сильное влияние на релаксацию оказывает интенсивность освещения, что иллюстрирует серия кривых, приведенных на рис. 4, б. С увеличением интенсивности растет начальный скачок и сокращается время задержки последующего нарастания. Все это происходит при больших приложенных напряжениях и таким образом, реализуется положительная обратная связь в газоразрядной ячейке с электродом из арсенида галлия с двумя плазменными контактами. Из приведенных вольтамперных характеристик на рис. 5 видно, что ток в газоразрядной ячейке до напряжения примерно 900 В отсутствует. При указанном напряжении происходит пробой газоразрядных зазоров и увеличение тока с повышением напряжения. Кривая снималась на двухкоординатном потенциометре типа ЛКД4-003, следующим образом: напряжение с примерно постоянной скоростью поднималось до некоторого фиксированного значения (**А** или **Б**, или **В**) и затем подъем напряжения резко прекращался, и с этого момента происходило самопроизвольное нарастание тока с одновременным уменьшением напряжения на газоразрядном зазоре. При остановке подъема напряжения ниже значения, соответствующего точке “**А**”, изменения тока во времени не происходило. В ходе кривых с различными скоростями подъема в точках “**А**”, “**Б**” и “**В**” наблюдается различные темпы самопроизвольного нарастания тока, то есть в точке “**В**” темп нарастания намного сильнее чем в точке “**А**”. Таким образом, значения токов и напряжений выше точки “**А**” по-существу являются нестационарными. На вид вольтамперных характеристик существенное влияние оказывает удельное сопротивление демпфирующего электрода из GaAs. Как видно из приведенных кривых на рис. 5,б при больших значениях удельного сопротивления GaAs ($5,7 \times 10^8$ Ом см – кривая 3) при имеющейся мощности источника напряжения самопроизвольное нарастание тока отсутствует. Таким образом, удельное сопротивление оказывает существенное влияние на темп самопроизвольного нарастания и величины фототока, причем чем меньше удельное сопротивление тем раньше и быстрее происходит самопроизвольное нарастание. Теперь обсудим вольтамперные характеристики показанных на рис. 6. Поскольку фотоприемным электродом является пластинка из Si<S>, то освещение производилось ИК-монохроматором с длиной волны 6,9 мкм (при этой длине волны данный фотоприемник имеет высокую чувствительность [7]). Как видно из кривых при больших интенсивностях ИК-излучения присутствует положительная обратная связь, электрод из GaAs с двумя плазменными контактами не только обеспечивает положительную обратную связь, а так же

стаб
или
зир
ует
горе

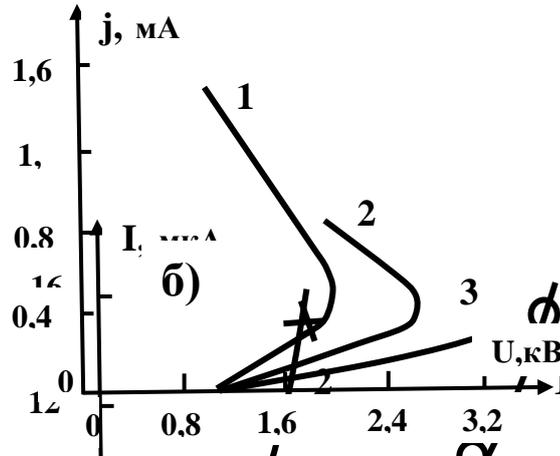
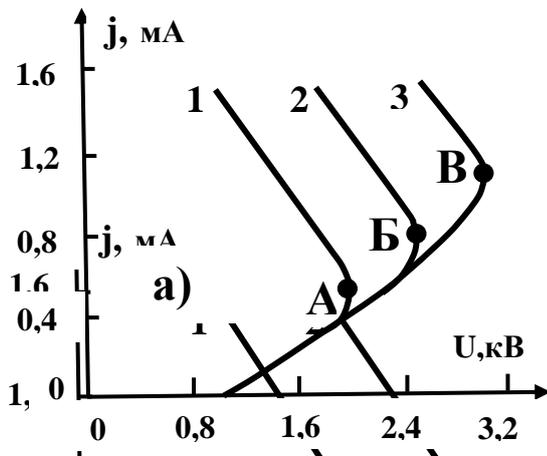


Рис. 5. Вольтамперные характеристики газоразрядной ячейки:

а) с конфигурацией расположения электродов согласно рис. 1, в демпфирующем фотоприемнике из GaAs с $\rho = 10^7$ Ом·см при различных скоростях подачи напряжения;
б) с различными значениями удельного сопротивления (ρ) демпфирующего фотоприемника из GaAs при одинаковых скоростях подачи напряжения. ρ равно: 1 – $\rho = 10^7$, 2 – $\rho = 8 \times 10^7$, 3 – $\rho = 5,7 \times 10^8$ Ом см. В обоих случаях интенсивность освещения (белый свет) не меняется.

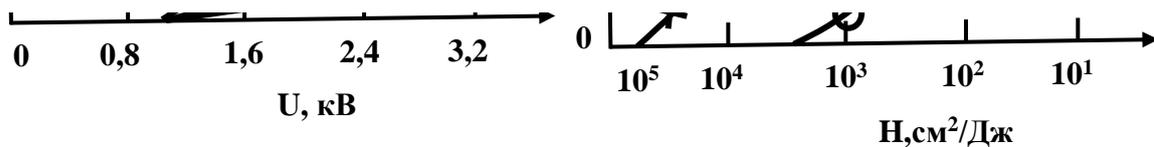


Рис. 6. Вольтамперные характеристики газоразрядной ячейки с фотоприемником из Si<S> и демпфирующим электродом из GaAs с $\rho = 10^7$ Ом см при одинаковых скоростях подачи напряжения и различных значениях интенсивности ИК-излучения J .
 J равно: 1 – $J = 8 \times 10^{-3}$, 2 – $J = 2,2 \times 10^{-3}$, 3 – $J = 4 \times 10^{-4}$ Вт/см².

Рис. 7. Характеристические кривые (зависимость величины тока ФЭУ в относительных единицах от экспозиции) газоразрядной ячейки с конфигурацией расположения электродов согласно рис. 1, в без усиления (кривая 1) и с усилением ИК-изображения на ЭП-16 (кривая 2).

ния разряда в сверхтонкой газоразрядной ячейке, а фотоприемник из Si<S> на входной части последней – фоточувствительность. Были исследованы фотографические свойства газоразрядной ячейки с дополнительной демпфирующей ячейкой с электродом из GaAs и фотоприемником из Si<S> (согласно конфигурации электродов на рис. 1, в). Необходимо отметить, что фотоприемник из Si<S> не стабилизирует разряд при температуре не только термоэлектрического охладителя, но и даже при температуре жидкого азота в ждущем режиме, то есть при постоянном токе. Только дополнительной демпфирующей ячейкой нам удалось получить фотографическое изображение щели ИК-монохроматора на длине волны 6,9 мкм при постоянном токе, то есть при ждущем режиме ПФИК. Как видно из приведенных характеристических кривых на рис. 7 фотографическая чувствительность составляет порядка 10^3 см²/Дж без усиления и 8×10^4 см²/Дж с усилением на ЭП-16.

Существенным научным достижением настоящей работы является то, что впервые в газоразрядной ячейке применяется демпфирующая дополнительная

ячейка (каскад) для стабилизации газового разряда и таким образом, появляется возможность продвижения инфракрасного фотографирования в далекую область вплоть до 10 мкм и дальше. Тип фотоприемника на входной части газоразрядной ячейки при таком расположении электродов (рис.1, в) не оказывает сильного влияния на стабилизации разряда, только обеспечивает фотографическую чувствительность. Можно сказать, что с подобными конфигурациями расположения электродов могут применяться чувствительные к ИК-излучению даже низкоомные фотоприемники с удельным сопротивлением менее чем 10^6 Ом×см для инфракрасного фотографирования. Однако, только температурный диапазон, обеспечивающий фотоэлектрический гистерезис с фотографическим эффектом [2,3], позволяет достичь высокую чувствительность и контрастность в ПФИК.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Йулдашев Х.Т., Касымов Ш.С., Хайдаров З. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 94.
2. Хайдаров З., Йулдашев Х.Т. // Прикладная физика. 2016. № 5. С. 75.
3. Хайдаров З., К.З. Хайдарова, Йулдашев Х.Т. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 65.
4. Парицкий Л.Г., Хайдаров З., Мухамадиев О., Дадабаев О. // ФТП. 1993. Т. 27, № 11/12. С. 2009.
5. Хайдаров З. и др. Авторское свидетельство России № 1672879 от 22.04.1991.
6. Хайдаров З. и др. Авторское свидетельство России № 1697572 от 08.08.1991.
7. Туланов В.Т., Сиябеков Х.Б., Давлетова А.Ш., Ортаева К.А. // ФТП. 2001. Т.35. № 8. С. 1009.
8. Rojot B., Nand C. // J. Phys. 1984. V.45, P.539.
9. Rojot B., Grossmann G., Astier M., Nand C. // Sol. St. Commun. 1985. V.54 (1). P.57.
10. Касымов Ш.С., Парицкий Л.Г., Хайдаров З. Полупроводники. – Ташкент: ТашПИ им. Низами, 1981.
11. Лодыгин А.Н., Парицкий Л.Г., Хайдаров З. // ФТП. 1983. Т. 7. № 8. С. 1543.
12. Хайдаров З. Дис, доктора физ.-мат. наук. – Ташкент: НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана, 2022 г.