

УДК 621.315.592: 621.382: 621.385

PACS: 52.80.-s

Высококочувствительная полупроводниковая ионизационная фотографическая камера для инфракрасного диапазона

З. Хайдаров, К. З. Хайдарова, Х. Т. Йулдашев

Экспериментально исследованы физические процессы в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом из кремния, легированного серой. Проведен теоретический расчет для предельной регистрируемой мощности излучения фотоприемника в газоразрядной ячейке с учетом параметров кремния, легированного серой. Экспериментально подтверждаются закономерности эффекта фотоэлектрического гистерезиса с фотоприемником из кремния, легированного серой, и обнаруженного ранее с фотоприемником из кремния, легированного платиной, в газоразрядной ячейке. На базе этих исследований создана высококочувствительная полупроводниковая фотографическая ионизационная камера (ПФИК).

Ключевые слова: фотографический эффект, фотоэлектрический гистерезис, газоразрядная ячейка, электронно-оптический преобразователь, видеоконтрольное устройства, цифровой сигнал, кремний, сера, фототок, темновой ток, преобразователь изображений ионизационного типа.

Введение

Полупроводниковая фотографическая ионизационная камера (ПФИК) находит своё применение в пространственной диагностике лазерных излучений и при фотографировании объектов в инфракрасной (ИК) области спектра [1–4].

Ранее обнаруженный **новый фотографический эффект** в сверхтонкой газоразрядной ячейке, названный **фотоэлектрическим гистерезисом** [1], открывает уникальные возможности ПФИК. Данный фотоэлектрический гистерезис формируется благодаря автоэлектронной эмиссии в сверхтонкой газоразрядной ячейке с толщиной $20 \div 40$ мкм. В области низких температур ($T = 85 \div 105$ К) нормальный скачок фотоэлектронного тока и аномальный скачок темнового тока обеспечивают высокую разрешающую способность ПФИК до $8 \div 10$ лин/мм в инфракрасной области излучения

($\lambda = 2,6 \div 4,2$ мкм) с фотоприемником из кремния, легированного платиной [5]. Ожидаемое расширение в более далёкую спектральную область для инфракрасного фотографирования требует дополнительных исследований с применением новым полупроводниковых материалов.

Целью данной работы являлось исследование возможностей ПФИК с фотоприемником из кремния, легированного серой [6].

Экспериментальная установка и методы исследования

Экспериментальная установка собрана из ПФИК [1] и видеоконтрольного устройства (ВКУ) типа AMJEON PRO UZB (производство Кореи). Фотографируемым и наблюдаемым объектом являлась щель ИК-монохроматора с призмой NaCl и источником света типа «глобар». Изображение щели проектировалось линзой из BaF_2 на приемную поверхность фотоприемника из $n\text{-Si}\langle S \rangle$ [6]. Интенсивность излучения, падающего на фотоприемник, была определена прямыми измерениями метрологическим термостолбиком типа ЛЭТИ с чувствительностью 0,72 В/Вт. Чувствительным (к ИК-излучению) электродом газоразрядной ячейки является изготовленная по специальной технологии полупроводниковая пластина из кремния, легированного серой ($n - \text{Si}\langle S \rangle$) [6]. Входная сторона полупроводниковой пластины снабжена устойчивым омическим контактом. Регистрирую-

Хайдаров Зокиржон¹, доцент.

Хайдарова Камолахон Зокиржон қизи², студентка.

Йулдашев Хуршидjon Толибович¹, старший научный сотрудник.

¹ Ферганский политехнический институт.

Узбекистан, 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, 86.

Тел.: (+99898) 576-09-94, (+99890) 588-16-79.

E-mail: zokir_nursuh@mail.ru, hurshid5704@mail.ru

² Ферганский филиал Ташкентского университета информационных технологий.

Узбекистан, 150118, г. Фергана, ул. Мустакиллик, 185.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

© Хайдаров З., Хайдаров К. З., Йулдашев Х. Т., 2017

щим элементом изображения газоразрядной ячейки служит волоконно-оптическая шайба, имеющая диаметр 36 мм и длину 70 мм, снабженная проводящим покрытием на входе (контрэлектрод, изготовлен из SnO₂). Волоконно-оптическая шайба, в свою очередь, стыкуется с входом электронно-оптического преобразователя ЭП-16, а выход последнего сопряжен с входом ВКУ. Сформированное изображение на экране электронно-оптического преобразователя (ЭОП) типа ЭП-16 (производство России) передается на монитор компьютера через ВКУ. Таким образом, обеспечивается компьютерная обработка инфракрасных изображений.

Начальное охлаждение охладителя ПФИК до 80 К обеспечивается жидким азотом, дальнейшее понижение температуры достигается подачей жидкого гелия.

Между полупроводниковой пластиной и контрэлектродом прикладывается высокое напряжение порядка 1200 В. Давление остаточного воздуха в газоразрядной ячейке составляет около 0,2 атм. На выходе волоконно-оптической шайбы невидимое изображение усиливается с помощью ЭП-16, а далее ВКУ преобразует его в цифровой сигнал. Таким образом, собранная нами фотографическая установка ИК-изображений имеет модернизированный вид с применением современных устройств.

Теория

Для получения изображений на выходе ПФИК необходимо выполнения следующих условий [7]:

$$j_C \geq \alpha j_T \quad (1)$$

$$j_C + j_T \geq j_{\text{ПР}} \quad (2)$$

где α – минимальная регистрируемая кратность фотоотклика, j_T и j_C – плотности токов соответственно темнового и фототоков, $j_{\text{ПР}}$ – пороговая плотность тока, фиксируемая регистрирующим узлом.

При монополярной примесной фотопроводимости в случае n -типа проводимости условия (1), (2) имеют следующий вид:

$$n_C \geq \alpha n_T, \quad (3)$$

$$n_C + n_T \geq j_{\text{ПР}} / e\mu E_{\text{max}}, \quad (4)$$

где e – заряд электрона, n_T и n_C – концентрация соответственно равновесных и неравновесных носителей, μ – подвижность электронов в зоне проводимости, E_{max} – предельная допустимая напряженность электрического поля в полупроводнике, при котором начинается монополярная инжекция.

С учетом захвата инжектированных носителей [8], величину E_{max} можно записать в виде:

$$E_{\text{max}} = \frac{en_T L}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[1 + \frac{N_D N_{\text{CM}}}{(N_{\text{CM}} + n_T)^2} \right]. \quad (5)$$

Предельная регистрируемая газоразрядной ячейкой мощность излучения $J_{\text{ПР}}$ может быть рассчитана по формуле из работы [9]:

$$J_{\text{ПР}} = \frac{\gamma}{q} \times \frac{n_c (N_D - m_T + n_T + n_c + N_{\text{CM}})}{m_T - n_T}, \quad (6)$$

где справедливы соотношения:

$$n_c = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 j_{\text{пр}}}{e^2 \mu L p_T \left[1 + \frac{N_D N_{\text{CM}}}{(N_{\text{CM}} + n_T)^2} \right]} - n_T;$$

$$m_T = \frac{N_D n_T}{N_{\text{CM}} + n_T};$$

$$N_{\text{CM}} = N_c \exp(-E_D) / kT]$$

В этих формулах использованы следующие обозначения: ε – диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 – электрическая постоянная (в системе СИ); N_D – концентрация донорной примеси – серы; E_D – энергия ионизации примеси; N_C – плотность состояний в зоне проводимости кремния; γ – коэффициент рекомбинации; q – сечение фотоионизации примеси; L – толщина фотоприемника.

Из формулы (6) для $J_{\text{ПР}}(T)$ следует зависимость пороговой регистрируемой мощности излучения от температуры.

На рис. 1 приведены зависимости $J_{\text{ПР}}(T)$, рассчитанные по формуле (6) в случае кремния, легированного серой [6]. В расчете были приняты следующие значения величин: $E_D = 0,18$ эВ; $N_D = 10^{16}$ см⁻³; $q = 10^{-16}$ см²; $n_T = 10^{10}$ см⁻³; $\gamma = 10^{-8}$ см³/с; $L = 7 \times 10^{-2}$ см.

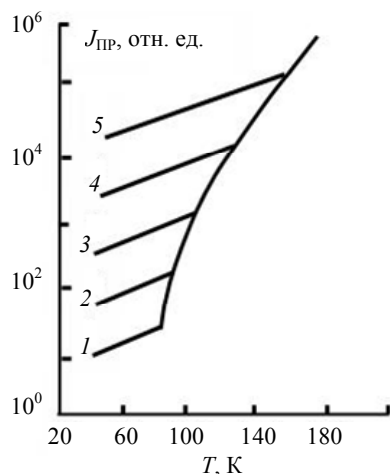


Рис. 1. Температурные (теоретические) зависимости пороговой регистрируемой мощности ИК-излучения при разных значениях предельной регистрируемой плотности тока $J_{пр}$: 1 – 10^{-9} А/см²; 2 – 10^{-7} ; 3 – 10^{-5} ; 4 – 10^{-3} ; 5 – 10^{-1} .

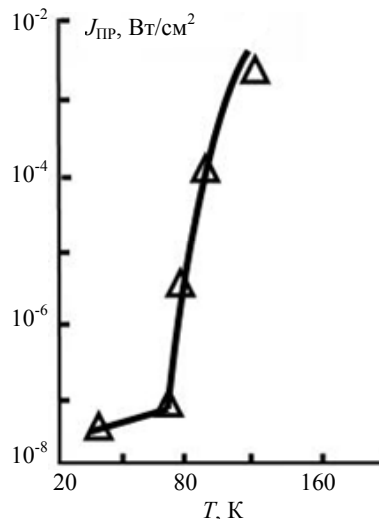


Рис. 2. Температурные (экспериментальные) зависимости пороговой регистрируемой мощности ИК-излучения в фотографической камере с фотоприемником из $p-Si<S>$ при $T = 60$ К.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментально исследованная зависимость порога чувствительности фотографической камеры от температуры приведена на рис. 2. Полученная экспериментальная кривая находится в качественном согласии с теоретическим расчетом. Результат в совокупности с качественными оценками порога является существенным экспериментальным подтверждением проделанных теоретических расчетов. Характерными особенностями является наличие пологого участка практической независимости предельной регистрируемой мощности излучения $J_{пр}$ от температуры. Действительно, уменьшения $J_{пр}$ с уменьшением температуры до значения $T = 85$ К сменяется значительно более медленным уменьшением $J_{пр}$ при дальнейшем снижении температуры. Это весьма важное обстоятельство обуславливает надёжность и стабильность функционирования преобразователя ПФИК в области пороговых характеристик. Таким образом, самое низкое пороговое значение регистрируемой мощности излучения обеспечивается в области температур, меньшей $T = 75$ К. причем с фотоприемником из кремния, легированного серой [6].

На рис. 3 приведены температурные зависимости темнового тока и фототока. Здесь видно, что они повторяют обнаруженные нами **эффекты фотоэлектрического гистерезиса** [1] в рабочей области температур $T = 55 \div 65$ К при интенсивности ИК-излучения $J = 5 \times 10^{-6}$ Вт/см² в диапазоне длин волн $\lambda = 4,6 \div 6,9$ мкм.

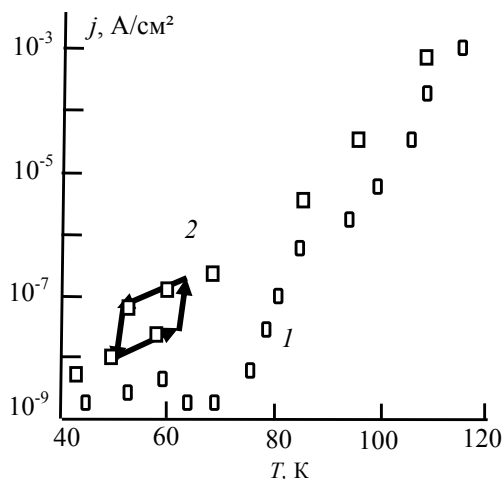


Рис. 3. Температурные зависимости темнового (кривая 1) и фототока (кривая 2) в ПФИК с фотоприемником из $p-Si<S>$.

На рис. 4 приведены характеристические кривые фотографического процесса с использованием фотографической регистрации усиленного инфракрасного изображения (в диапазоне длин волн $\lambda = 4,6 \div 6,9$ мкм) с экрана ЭП-16 фотокамерой с объективом, обладающим светосилой 1:2, на фотопленку типа РФ-3. Как следует из приведенной характеристической кривой, фотографическая чувствительность определяется величиной порядка $H = 1/(Jt) = 5 \times 10^8$ см²/Дж. Для вышеуказанного спектрального диапазона длин волн достигнутая фотографическая чувствительность является достаточно высокой.

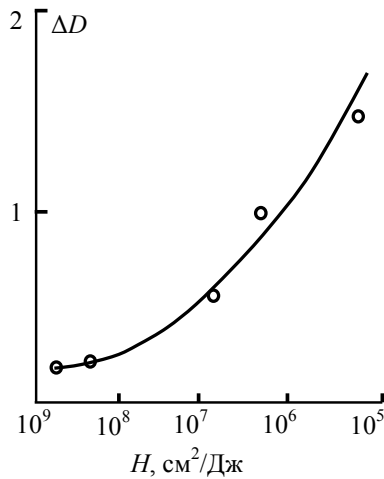


Рис. 4. Характеристическая кривая зависимости абсолютной величины оптической плотности изображения ΔD от экспозиции H .

Обсуждение результатов

Сравнивая расчетные кривые (рис. 1) и экспериментальные данные (рис. 2 и рис. 4), можно сделать вывод о том, что имеется экспериментальные подтверждения предварительно проделанных теоретических расчетов. В зависимости темнового тока от температуры (рис. 3, кривая 1) наблюдается резкое снижение темнового тока ниже температуры $T = 85$ К, а в зависимости фототока (кривая 2) – фотоэлектрический гистерезис. В характеристической зависимости наблюдается высокая чувствительность фотографического процесса $H = 1/(Jt) = 5 \times 10^8 \text{ см}^2/\text{Дж}$ для спектрального диапазона ИК-излучений $\lambda = 4,6 \div 6,9$ мкм.

Плотность потока мощности ИК-излучения, падающего на фотоприемник для пороговой регистрации, составляет $10^{-8} \text{ Вт}/\text{см}^2$, что соответствует интенсивности 8×10^{10} квант/ $(\text{см}^2 \text{ с})$. Подобная чувствительность в диапазоне $\lambda = 4,6 \div 6,9$ мкм с разрешением $8 \div 10$ лин/мм, а в отдельных случаях и 15 лин/мм (экспериментально обнаруживается) не фиксируется ни в одном существующем фотографическом приборе в вышеуказанном ИК-диапазоне.

Заключение

В работе исследованы фотоэлектрические и фотографические свойства газоразрядной ячейки с полупроводниковым светочувствительным электродом из $n - Si < S >$ для инфракрасного фотографического процесса. **Эффект фотоэлектрическо-**

го гистерезиса, обнаруженный нами ранее с фотоприемником из $p - Si < Pt >$ [5], находит новое закономерное подтверждение. Фотоприемники из $n - Si < S >$ в ПФИК [6] обеспечивает высокочувствительную фотографическую регистрации объектов и физических процессов в диапазоне $\lambda = 4,6 \div 6,9$ мкм именно благодаря эффекту фотоэлектрического гистерезиса.

Заметим, что проведенные совместные опыты сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) и Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, (США) в газоразрядной ячейке ПФИК с нашим фотоприемником из $n - Si < S >$ не дали желаемых результатов (письмо В. М. Муругова от 15 марта 2006). Однако в этих опытах рабочая температура фотоприемника составляла $T = 100$ К. Подобная температура, как видно из нашего экспериментального результата (рис. 3), находится за пределами области **фотоэлектрического гистерезиса**, и поэтому здесь не могла быть достигнута высокая чувствительность с желаемой разрешаемой способностью, т. е. не менее 8 лин/мм. Таким образом, эффект фотоэлектрического гистерезиса является необходимым условием для достижения высокой чувствительности фотографического процесса в газоразрядной ячейке преобразователях изображений ионизионного типа в далекой ИК-области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдаров З., Йулдашев Х. Т. // Прикладная физика. 2016. № 5. С. 75.
2. Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 94.
3. Касымов Ш. С., Парицкий Л. Г., Хайдаров З., Отажонов С. М. // Физическая инженерия поверхности. 2010. Т. 8. № 3. С. 214.
4. Касымов Ш. С., Хайдаров З., Йулдашев Х. Т., Отажонов С. М. // Физическая инженерия поверхности. 2011. Т. 9. № 4. С. 376.
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. Бурова Т. В., Лодыгин А. Н., Парицкий Л. Г., Хайдаров З. / Тез. Докл. IV Всесоюз. конф. (Черноголовка. 1984). Т. 2. С. 213.
8. Ламперт М., Марк П. // Инжекционные токи в твердых телах. – М.: Мир. 1973.
9. Рывкин С. М. // Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: Наука. 1963.

A highly sensitive semiconductor photographic ionizing camera for infrared range

Z. Khaydarov¹, K. Z. Khaydarova², and Kh. T. Yuldashev¹

¹Fergana Polytechnic Institute
86 Fergana str., 150107, Fergana, Uzbekistan
E-mail: zokir_nursuh@mail.ru, hurshid5704@mail.ru

²Ferghana Branch of the Tashkent University of Information Technologies
185 Mustaqillik str., 150118, Fergana, Uzbekistan

Received November 1, 2016

Physical processes in an ultrathin gas discharge cell with a semiconductor electrode made of silicon doped with sulfur have been experimentally studied. A theoretical calculation of the ultimate power of our photodetector has been done. Experiments confirmed the laws of the photoelectric effect such as the hysteresis for the photodetector made of silicon doped with sulfur. This effect has been detected earlier with the photodetector of the silicon doped with platinum in a discharge cell. A highly sensitive semiconductor photographic ionizing camera has been done for infrared range.

Keywords: photographic effect, photographic hysteresis, gas-filled cell, electro-optical convertor, picture monitor, digital signal, silicon, sulfur, photocurrent, dark current, image convertor ionizing type.

REFERENCES

1. Z. Khaydarov and Kh. T. Yuldashev, Prikl. Fiz., No. (5), 75 (2016).
2. X. T. Yuldashev, Sh. S. Kasymov, and Z. Khaidarov, Prikl. Fiz., No. 2, 94 (2016).
3. Sh. S. Kasymov, L. G. Paritskiy, Z. Khaydarov, and S. M. Otajonov, Physical Engineering of Surface **8** (3), 214 (2010).
4. Sh. S. Kasymov, Z. Khaydarov, Kh. T. Yuldashev, and S. M. Otajonov, Physical Engineering of Surface **9** (4), 376 (2011).
5. Z. Khaydarov and others, RF Patent No. 1672879, April 22, 1991.
6. Z. Khaydarov and others, RF Patent No. 1697572, August 08, 1991.
7. T. V. Burova, A. N. Lodygin, L. G. Paritskiy, Z. Khaydarov, in Proc. IV All-Russian Conference (Chernogolovka, 1984). Vol. 2, p. 213.
8. M. Lampert and P. Mark, *Injection Currents in Solids* (Mir, Moscow, 1973) [in Russian].
9. S. M. Ryvkin, *Photoelectric Phenomena in Semiconductors* (Nauka, Moscow, 1963).