

ПОЛУПРОВОДНИКОВОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

SEMICONDUCTOR MATERIALS SCIENCE

УДК 537.534.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ФОТОПРОВОДИМОСТИ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО СЕРОЙ ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ВКЛЮЧЕНИЯХ

*Мавлянов Абдулазиз Шавкатович**, д.ф.(PhD) по ф.-м.н., заведующий лабораторией ДК “Узбекско-Японский молодёжный центр инноваций” при ТашГТУ, Ташкент, Узбекистан. e-mail: microelectronics74@mail.ru

Халтурсунов Эркин Беркинбаевич, кандидат технических наук, доцент Туринского Политехнического Университета в г.Ташкенте, Директор “Узбекско-Японского молодёжного центра инноваций” при ТашГТУ, Ташкент, Узбекистан. e-mail: ujicv.gov@gmail.com, ekhaltursunov@polito.uz

Азизов Музаффар Комилович, младший научный сотрудник, ДК “Узбекско-Японский молодёжный центр инноваций” при ТашГТУ, Ташкент, Узбекистан. e-mail: azizov.muzaffar@inbox.ru

Мавлонова Хурзода Козимжон кизи, магистр кафедры “ЦЭиМ” ФЭА ТашГТУ, Ташкент, Узбекистан. e-mail: inspirant94@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты исследования спектров фотопроводимости исходных образцов кремния *p*-типа с $\rho = 1$ Ом·см, легированных серой в темновых условиях и при постоянной подсветке при прямом и обратном включениях. При прямом включении диодной структуры наблюдалась отрицательная фотопроводимость, связанная с инжекцией носителей тока, обусловленной наличием уровня $E = 0,4$ эВ. Обнаружен отчетливый минимум при значении $E \approx 0,52$ эВ, где имеет место инфракрасное гашение фотопроводимости (ИКГФП) в образцах как в прямом так при обратном включениях при постоянной подсветке.

Ключевые слова: Фотопроводимость, глубокие уровни, легирование, инжекция, темновые условия, кремний, сера, фототок, ИК-гашение, отрицательная фотопроводимость.

STUDY OF PHOTOCONDUCTIVITY SPECTRUM OF SULFUR-DOPED SILICON IN FORWARD AND BACKWARD CONNECTION MODES.

*Mavlyanov Abdulaziz Shavkatovich**, PhD, Head of Laboratory, TSTU-affiliated “Uzbekistan-Japan Innovation Center of Youth”, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: microelectronics74@mail.ru

Khaltursunov Erkin Berkinbayevich, Cand. of Tech. Sc. (PhD), Asst. Prof. of Turin Polytechnic University in Tashkent, Director of “Uzbekistan-Japan Innovation Center of Youth”, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: ujicv.gov@gmail.com

Azizov Muzaffar Komilovich, Researcher, TSTU-affiliated “Uzbekistan-Japan Innovation Center of Youth”, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: azizov.muzaffar@inbox.ru

Mavlonova Khurzoda Kozimjon qizi, Master student, Department “Digital Electronics and Microelectronics” Faculty of Electronics and Automation, TSTU, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: inspirant94@mail.ru

Abstract. The paper reports results of study of photoconductivity spectrum of sulfur-doped samples of silicon (initial p -type silicon with $\rho = 1 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$) under dark conditions and while samples were subjected to constant light in forward and reverse switching modes. The authors report negative photoconductivity of the diode structure in forward mode, which is most likely associated with the injection of current carriers, associated with the level $E = 0,4 \text{ eV}$. A sharp decrease in photoconductivity was detected at $E \approx 0,52 \text{ eV}$, where one can witness infrared quenching of photoconductivity (IRQ) in samples in forward and reverse modes in light.

Keywords: photoconductivity, deep levels, doping, injection, dark conditions, silicon, sulfur, photocurrent, IR-quenching, negative photoconductivity.

1. Введение

В последнее время особое внимание уделяется исследованию оптических и фотоэлектрических свойств кремния, легированного халькогенидами, в частности серой, которая образует донорные центры в кремнии. Этот интерес, среди прочего, обусловлен возможностью исследования квантово-оптических эффектов в легированных полупроводниках. Возбужденные состояния серы формируют водородоподобный спектр, в то время как основное состояние располагается значительно глубже в запрещенной зоне кремния по сравнению с примесями V группы [1-5]. Сера в кремнии интересна тем, что некоторые оптические переходы, запрещенные для мелких доноров, для глубокого центра серы являются разрешенными [6].

Фотопроводимость (ФП) кремния, легированного серой, изучалась в работе [7]. В данной работе пластины исходного кремния p -типа имели удельное сопротивление $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После легирования серой при температуре 1200°C исходный кремний превращался соответственно в i – тип с $\rho = 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и в n -тип с $\rho = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Измерения проводились с помощью спектрометра ИКС-21 при температуре 77K . Темновая фотопроводимость в образцах с $\rho = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ начиналась с $h\nu = 0,3 \text{ эВ}$ и имела небольшой максимум при $h\nu = 0,38 \text{ эВ}$. В i – тип образцах с $\rho = 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ темновой спектр имел монотонный характер. В данных образцах темновая фотопроводимость монотонно росла с $h\nu \geq 0,5 \text{ эВ}$.

В настоящей статье приводятся результаты исследования спектра фотопроводимости образцов кремния, легированных серой в темновых условиях и при постоянной подсветке в прямом и обратном включениях и соответственно приведены кривые зависимости тока в образцах от энергии падающих фотонов.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе, авторы исследовали спектры фотопроводимости исходных образцов кремния p -типа с $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (марки КДБ-1), легированных серой в темноте и при подсветке от обычной лампы накаливания в 2В при прямом и обратном включениях.

Измерения фотопроводимости образцов, легированных S проводились с помощью спектрометра ИКС-21, снабженного криостатом, который позволяет изучать фотопроводимость в широкой области температур ($T = 77\div 350 \text{ K}$). Для изучения только примесной ФП служил двойной фильтр из полированной пластины монокристаллического кремния, которая была установлена перед окошком криостата после глобара ИКС-21.

Омические контакты из InGa (97%-3%) наносились на лицевую поверхность с p -типом проводимости, а на тыльную поверхность с n -типом проводимости наносился контакт из InSn (52%-48%). Указанный образец также оказался чувствительным к свету.

ФП в темноте и при подсветке снимались по стандартной схеме. Значения тока фиксировали универсальным наноамперметром ЦЗ00.

3. Результаты и их обсуждение

Особенностью поведения серы в кремнии является большой разброс энергий ионизации E_i , определенных различными авторами [8].

Такую неоднозначность значений энергии ионизации и полосу энергий ионизации в области $h\nu = 0,28 \div 0,38$ эВ авторы [7] объясняют тем, что сера в кремнии является сравнительно мелким однозарядным донором, а образование более глубоких примесных уровней может быть связано с тем, что сера сравнительно легко образует ассоциации близко расположенных однозарядных атомов и энергии ионизации электронов определяются не только потенциалом ионизации изолированного атома серы, но и кулоновским взаимодействием ионов, входящих в ассоциацию.

При рассмотрении кривой спектра фотопроводимости (где по оси x – отложена энергия падающих квантов $h\nu$ эВ, а по оси y – значения фототока I_ϕ в А) образца $Si\langle S \rangle$ при обратном включении в темноте, фотоответ наблюдался при значении $h\nu = 0,26$ эВ и дальнейший рост ФП можно было наблюдать при значениях $h\nu = 0,4$ эВ и $h\nu = 0,85$ эВ (рис.1). На рис.2. представлена кривая спектра ФП при постоянной собственной подсветке от лампы в 2В в обратном включении диодной структуры. Также были исследованы спектры фотопроводимости в темноте и при постоянной собственной подсветке (рис.3) в прямом включении диодной структуры.

В работе [7] для образцов кремния, легированных серой, темновая фотопроводимость в образцах $\rho = 10^3$ Ом-см начиналась с $h\nu = 0,3$ эВ, а в образцах $Si\langle S \rangle_i$ – типа проводимости с $\rho = 10^5$ ом-см при комбинированном освещении слабое гашение наблюдалось при $h\nu \geq 0,35$ эВ, а начиная с $h\nu \geq 0,5$ эВ глубина гашения достигала 95%.

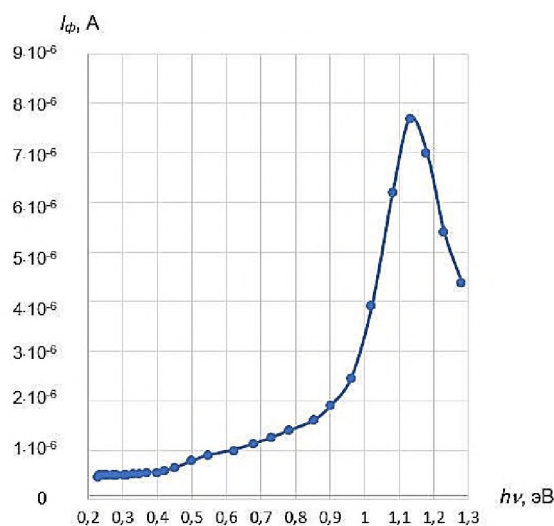


Рис. 1. Спектральная зависимость ФП образца $Si\langle S \rangle$ (исходный КДБ-1 с $\rho = 1$ Ом-см) в темновых условиях при температуре $T = 77K$ в обратном включении

В исследуемых нами образцах в темновых условиях при прямом включении (рис.3) спектр фотопроводимости начинается с 0,26эВ и возрастает до 0,4эВ. При 0,4эВ спектр ФП в темноте уменьшается и ФП становится меньше чем темновой ток. Здесь мы вероятнее всего наблюдаем отрицательную фотопроводимость при инжекции носителей тока, связанной с

уровнем 0,4эВ. При постоянной подсветке ФП начинается с $E_f \approx 0,25$ эВ и уменьшается в интервале 0,4эВ с резким минимумом при значении $E \approx 0,52$ эВ, где имеет место инфракрасное гашение фотопроводимости (ИКГФП).

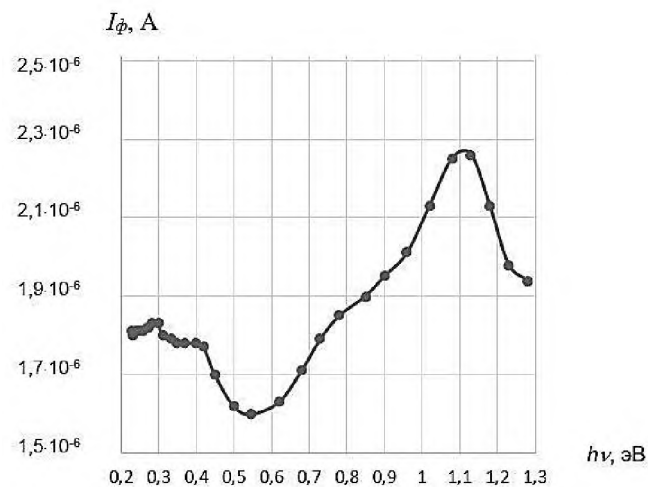


Рис. 2. Спектральная зависимость ФП образца $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ (исходный КДБ-1 с $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) при постоянной подсветке при температуре $T = 77\text{K}$ в обратном включении

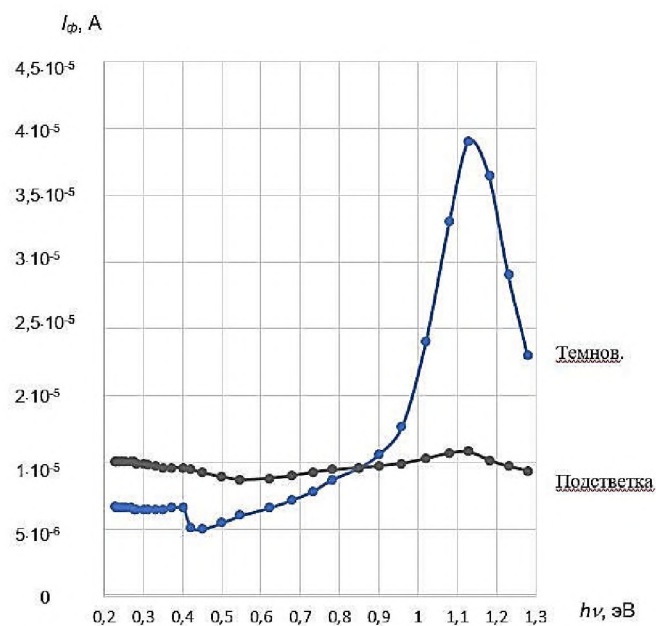


Рис. 3. Спектральная зависимость ФП образца $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ (исходный КДБ-1 с $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) в темноте и при постоянной подсветке при $T = 77\text{K}$ в прямом включении

Можно предположить, что в прямом направлении темновой ток обусловлен тем, что из контактов происходит инжекция носителей тока. При включенном напряжении электроны захватываются на уровень $E_i = 0,4$ эВ, поскольку концентрация на уровне 0,25 эВ мала и на этом участке фототок определяется дырками.

4. Заключение

Таким образом, можно сказать, что при прямом включении диодной структуры мы наблюдаем отрицательную фотопроводимость, связанную с инжекцией носителей тока,

связанную с уровнем $E=0,4\text{эВ}$ [8,9]. При постоянной подсветке ФП начинается с $E_i\approx 0,26\text{эВ}$ и уменьшается в интервале $0,4\text{эВ}$ с относительно резким минимумом при значении $E\approx 0,52\text{эВ}$, где имеет место инфракрасное гашение фотопроводимости (ИКГФП). Это особенно отчетливо заметно на рис.2 при постоянной подсветке при обратном включении структуры.

При сопоставлении спектров ФП в обоих направлениях, можно заметить, что на обеих кривых спектра ФП имеются одинаковые значения уровней ионизации, только с тем различием, что в прямом направлении мы наблюдаем отрицательную фотопроводимость, связанную с инжекцией носителей тока с контактов. Люкс-амперная характеристика такой структуры приведена в работе [10].

Предварительные исследования тока короткого замыкания и напряжения холостого хода *p-n*-структур, а также ФП структур вместе с анализом люкс-амперной характеристики в работе [10] показали, что данные структуры можно принципиально рассматривать в качестве фотодиода и солнечного элемента. Дальнейший расчет коэффициента заполнения и К.П.Д. данных структур позволит рассмотреть перспективность структур в качестве солнечных элементов.

Литература

1. Ю.А. Астров, А.Н. Лодыгин, Л.М. Порцель, В.Б.Шуман, S.A.Lynch, А.А. Махова. Кремний с повышенным содержанием одноатомных центров серы: получение и оптическая спектроскопия. 2013, ФТП, Т. 47, Вып.2, С. 211-215.
2. Т.С. Непомнящий. В сб.: Материалы межвузовской научной конференции XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. VI. 2001, Санкт-Петербург, государственный технический университет, с.58.
3. Yu.A. Astrov, L.M. Portsel, A.M. Lodygin, V.B. Shuman. Planar microdischarge device for high-speed infrared thermography: Application of selenium-doped silicon detectors. 2008, J. Appl. Phys., 103, 114512.
4. Ю.А. Астров, В.Б. Шуман, А.Н. Лодыгин, Л.М. Порцель, А.Н. Махова. Разработка фотоприемников для преобразователей изображений: легирование кремния селеном из газовой фазы. 2008, ФТП, Т.42, Вып. 4, с. 457.
5. Yu.A. Astrov, L.M. Portsel, A.M. Lodygin, V.B. Shuman, N.V. Abrosimov. Planar sulfur-doped silicon detectors for high-speed infrared thermography. 2009, Infr. Phys. Technol., Vol. 52, P25-31.
6. Ю.А. Астров, В.А. Козлов, А.Н. Лодыгин, Л.М. Порцель, В.Б. Шуман, Е.Л. Gurevich, R. Hergenroder. Перераспределение глубоких примесей селена и серы в кремнии при легировании поверхности фосфором. 2009, ФТП. Т. 43, Вып. 6, с. 739-744.
7. Лебедев А.А., Мамадалимов А., Махкамов Ш. 1974, ФТП. № 8, с. 262-266.
8. А.Ш. Мавлянов Фотоэлектрические измерения кремния, легированного марганцем и серой. 2018, Mauritius, LambertAcademicPublishing.
9. И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев. 2008, Физика и техника полупроводников. том 42, вып. 1, с. 113-127.
10. Лебедев А.А., Мамадалимов А.Т. Зависимость фотоответа в примесной области спектра при низких температурах от степени компенсации образцов. 1975, ФТП, Т.9, № 8, с.1609-1611.

References

1. Yu.A. Astrov, A.N. Lodygin, L.M. Porcel, V.B. Shuman, S.A. Lynch, A.A. Mahova. *Kremnij s povyshennym sodержaniem odnoatomnyh centrov sery: poluchenie i opticheskaya spektroskopiya* [Silicon with a high content of monatomic sulfur centers: production and optical spectroscopy]. 2013, FTP [Phys. and Tech of Semicond.], v. 47, Issue.2, pp. 211-215 (In Russ.)
 2. T.S. Nepomnyashij. *Issledovanie diffuzii sery v kremnii* [Study of diffusion of sulfur in silicon]. 2001, V sb.: *Materialy mezhvuzovskoj nauchnoj konferencii XXIX Nedelya nauki SPbGTU. Ch. VI* [Materials of interinstitutional scientific conference XXIX Science Week SPbGTU. Section. VI] pp.58 (In Russ.)
 3. Yu. A. Astrov, L.M. Portsel, A.M. Lodygin, V.B. Shuman. Planar microdischarge device for high-speed infrared thermography: Application of selenium-doped silicon detectors. 2008, J. Appl. Phys., 103, 114512.
 4. Ю.А. Астров, В.Б. Шуман, А.Н. Лодыгин, Л.М. Порцель, А.Н. Махова. *Разработка фотоприемников для преобразователей изображений: легирование кремния селеном из газовой фазы*. 2008, ФТП, Т.42, Вып. 4, с. 457.
 5. Yu.A. Astrov, L.M. Portsel, A.M. Lodygin, V.B. Shuman, N.V. Abrosimov. Planar sulfur-doped silicon detectors for high-speed infrared thermography. 2009, Infr. Phys. Technol., Vol. 52, P25-31.
 6. Yu.A. Astrov, V.A. Kozlov, A.N. Lodygin, L.M. Porcel, V.B. Shuman, E.L. Gurevich, R. Hergenroder. *Pereraspredelenie glubokih primesej selena i sery v kremnii pri legirovanii poverhnosti fosforom* [Re-distribution of deep-level impurities of selenium and sulfur in silicon at doping of silicon surface with phosphorus]. 2009, FTP [Phys. and Tech of Semicond.], v. 43, Issue.6, pp. 739-744 (In Russ.)
 7. Lebedev A.A., Mamadalimov A., Mahkamov Sh. FTP. № 8, s. 262-266 (1974).
 8. Mavlyanov. *Fotoelektricheskie izmereniya kremniya, legirovannogo margancem i seroj* [Photoelectric measurement of silicon doped with sulfur and manganese]. 2018, P.49. Mauritius, Lambert Academic Publishing.
 9. I.M. Vikulin, Sh.D. Kurmashev, V.I. Stafeev. 2008, *Fizika i tehnika poluprovodnikov* [Phys. and Tech of Semicond.], v. 42, Issue.1, pp. 113-127 (in Russ.)
 - 10 A.A. Lebedev, A Mamadalimov. *Zavisimost fotootveta v primesnoj oblasti spektra pri nizkih temperaturah ot stepeni kompensacii obrazcov* [Dependence of photoresponse in impurity region at low temperatures on compensation degree of the samples]. 1975, FTP [Phys. and Tech of Semicond.], V.9, № 8, pp.1609-1611 (In Russ.)
-

1. Introduction

Recently, special attention has been paid to the study of the optical and photoelectric properties of silicon doped with chalcogenides, in particular sulfur, which forms donor centers in silicon. This interest, among other things, is due to the possibility of studying quantum optical effects in doped semiconductors. Excited states of sulfur form a hydrogen-like spectrum, while the ground state is located much deeper in the silicon band gap in comparison with group V impurities [1–5]. Sulfur in silicon is interesting because some optical transitions forbidden for shallow donors are allowed for the deep center of sulfur [6].

The photoconductivity (PC) of sulfur doped with silicon was studied in [7]. In this work, the initial p-type silicon wafers had a resistivity of $\rho = 20$ Ohm·cm. After doping with sulfur at a temperature of 1200°C, the initial silicon was transformed, respectively, into i-type with $\rho = 10^5$ Ohm·cm and into an n-type with $\rho = 10^3$ Ohm·cm. The measurements were carried out using an ИКC-21 spectrometer at a temperature of 77K. Dark photoconductivity in samples with $\rho = 10^3$ Ohm·cm began with $h\nu = 0,3$ eV and had a small maximum at $h\nu = 0,38$ eV. In i - type samples with $\rho = 10^5$ Ohm·cm, the dark spectrum was monotonic. In these samples, the dark photoconductivity monotonically increased with $h\nu \geq 0,5$ eV.

This article presents the results of a study of the photoconductivity spectrum of silicon samples doped with sulfur under dark conditions and with constant illumination in the forward and reverse inclusions and, respectively, the curves of the dependence of the current in the samples on the energy of incident photons are presented.

2. Experimental technique

In this work, the authors investigated the photoconductivity spectra of the initial p-type silicon samples with $\rho = 1$ Ohm·cm (model КДБ-1) doped with sulfur in the dark and when illuminated from a conventional incandescent lamp in 2V with direct and reverse switching.

The photoconductivity of samples doped with S was measured using an ИКC-21 spectrometer equipped with a cryostat, which allows one to study photoconductivity in a wide temperature range ($T = 77 \div 350$ K). To study only the impurity PC, we used a double filter from a polished plate of single-crystal silicon, which was installed in front of the cryostat window after the ИКC-21 globalar.

Ohmic contacts from InGa (97% -3%) were applied to the front surface with p-type conductivity, and an InSn contact (52% -48%) was applied to the back surface with n-type conductivity. The specified sample was also sensitive to light.

PC in the dark and under illumination were shot according to the standard scheme. The current values were recorded with a ИИ300 universal nanoammeter.

2. Results and discussion

A feature of the behavior of sulfur in silicon is a large spread in the ionization energies E_i determined by various authors [8].

The authors of [7] explain this ambiguity of the ionization energy and the ionization energy band in the region $h\nu = 0,28 \div 0,38$ eV by the fact that sulfur in silicon is a relatively shallow singly charged donor. The formation of deeper impurity levels can be associated with that sulfur relatively

easily forms associations of closely spaced singly charged atoms and electron ionization energies are determined not only by the ionization potential of an isolated sulfur atom, but also by the Kulon interaction of the ions that make up the association.

When considering the curve of the photoconductivity spectrum (where the x-axis shows the energy of incident quanta $h\nu$ in eV, and the y-axis shows the photocurrent I_{ph} in A) of the $Si \langle S \rangle$ sample when it was turned back on in the dark, a photoresponse was observed at $h\nu = 0,26$ eV and a further increase in the PC could be observed at $h\nu = 0,4$ eV and $h\nu = 0,85$ eV (fig. 1). fig. 2. A curve of the spectrum of the PC is presented for constant self-illumination from a 2V lamp in the reverse switching of the diode structure. The photoconductivity spectra in the dark and with constant self-illumination (pic. 3) in the direct connection of the diode structure were also studied.

In [7], for silicon samples doped with sulfur, the dark photoconductivity in the samples $\rho = 10^3$ Ohm·cm began with $h\nu = 0.3$ eV, and in the samples $Si \langle S \rangle i$ - the type of conductivity with $\rho = 10^5$ Ohm·cm under combined illumination, weak damping was observed at $h\nu \geq 0,35$ eV, and starting from $h\nu \geq 0,5$ eV, the damping depth reached 95%

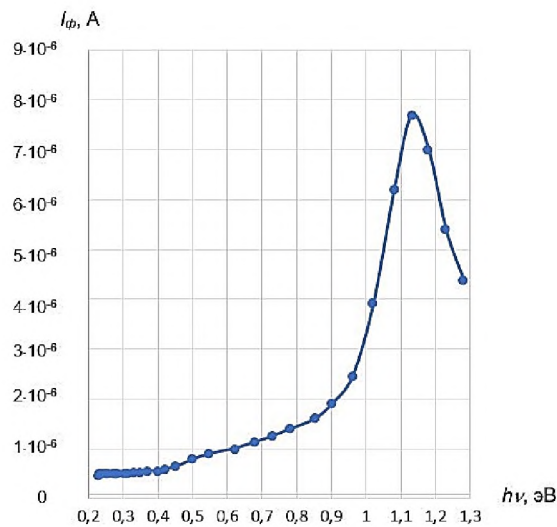


Fig. 1. The spectral dependence of the PC of the $Si \langle S \rangle$ sample (initial KDB-1 with $\rho = 1$ Ohm·sm) under dark conditions at a temperature of $T = 77$ K in the reverse inclusion

In the samples under study, under dark conditions with direct inclusion (Fig. 3), the photoconductivity spectrum begins from 0.26 eV and increases to 0.4 eV. At 0.4 eV, the phase transition spectrum in the dark decreases and the phase transition becomes smaller than the dark current. Here, we most likely observe negative photoconductivity upon injection of current carriers associated with a level of 0.4 eV. With constant illumination, the phase transition begins with $E_i \approx 0,25$ eV and decreases in the range of 0.4 eV with a sharp minimum at $E \approx 0,52$ eV, where infrared quenching of photoconductivity (IRQPC) takes place.

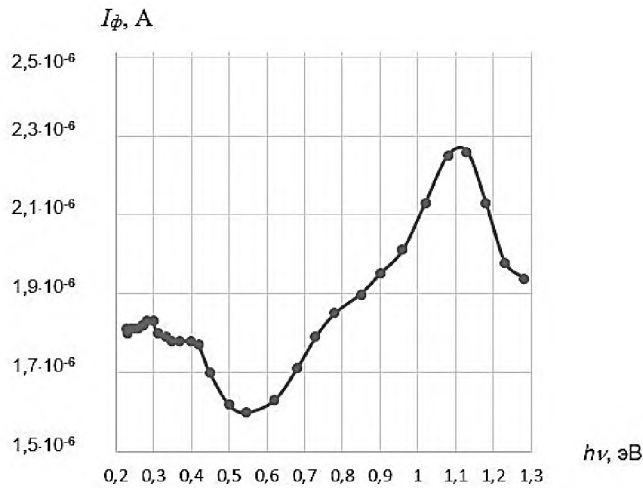


Fig. 2. The spectral dependence of the PC of the Si <S> sample (initial KDB-1 with $\rho = 1 \text{ Ohm}\cdot\text{sm}$) under constant illumination at a temperature of $T = 77 \text{ K}$ in the reverse state

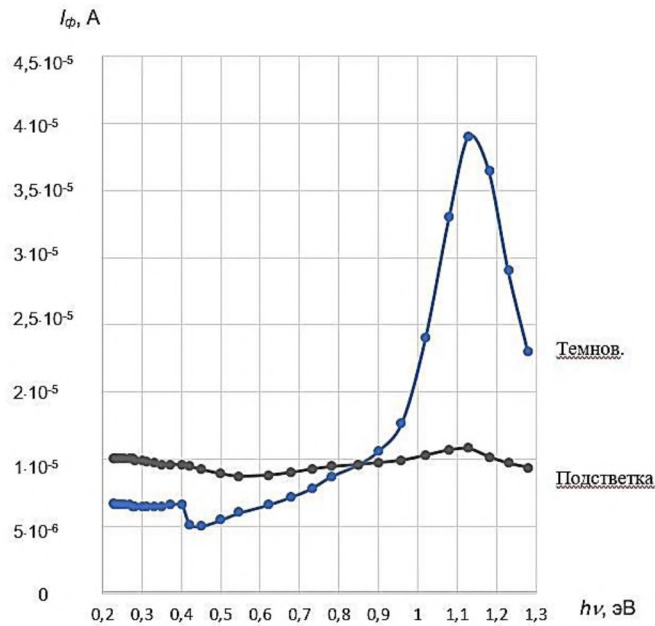


Fig. 3. Spectral dependence of the PC of the Si <S> sample (initial KDB-1 with $\rho = 1 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$) in the dark and with constant illumination at $T = 77 \text{ K}$ in direct connection

It can be assumed that in the forward direction the dark current is due to the fact that injection of current carriers occurs from the contacts. When the voltage is on, the electrons are captured at the level $E_i = 0.4 \text{ eV}$, since the concentration at the level of 0.25 eV is small and the photocurrent in this section is determined by holes.

3. Conclusion

Thus, we can say that with the direct inclusion of the diode structure, we observe negative photoconductivity associated with the injection of current carriers, associated with the level $E = 0.4 \text{ eV}$ [8.9]. With constant illumination, the phase transition begins with $E_i \approx 0.26 \text{ eV}$ and decreases in the range of 0.4 eV with a relatively sharp minimum at $E \approx 0.52 \text{ eV}$, where infrared quenching of photoconductivity (IRQPC) takes place. This is especially clearly seen in pic. 2 with constant illumination during the reverse inclusion of the structure.

When comparing PC spectra in both directions, one can notice that on both curves of PC spectrum there are identical ionization levels, with the only difference being that in the forward direction we observe negative photoconductivity associated with the injection of current carriers from the contacts. The lux-ampere characteristic of such a structure is given in [10].

Preliminary studies of the short circuit current and open circuit voltage of p-n structures, as well as the phase transition structures together with the analysis of the lux-ampere characteristic in [10] showed that these structures can be fundamentally considered as a photodiode and solar cell. Further calculation of fill factor and efficiency of these structures will allow us to consider the prospects of structures as solar cells.