Фотоэлектрические свойства гетероструктур *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$

С.З. Зайнабидинов[1], А.Й. Бобоев[*,1,2], А.Ж. Акбаров[1]

[1]Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура, Университетская 129, 170100, Андижан, Узбекистан
[2]НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана, ул. Новый Алмазар, 20, 100057,Ташкент, Узбекистан

Получена 03.06.2022, revised 29.09.2022

* Corresponding author: e-mail aboboevscp@gmail.com, Phone: +99 890 122 20 50

Определено, что спектральная зависимость фототока охватывает широкий интервал энергии падающих квантов от 1.07 эВ до 3 эВ. Показано, что с увеличением температуры начала кристаллизации максимумы спектральной зависимости фотоЭДС смещаются в более коротковолновую область длин волн и начало кристаллизации слоя твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ увеличивается, время жизни фотоносителей также растет от 10^{-7} с при температуре начала кристаллизации $T_{нк}$=650°C до 5×10^{-5} с при $T_{нк}$=730°C.

Ключевые слова: гетеропереход, твердый раствор, температура кристаллизация, фототок, фоточувствительность, фотоЭДС, фотолюминесценция.

It is determined that the spectral dependence of the photocurrent covers a wide range of incident photon energies from 1.07 eV to 3 eV. It is shown that with an increase in the temperature of the onset of crystallization, the maxima of the spectral dependence of the photoEMF shift to a shorter wavelength region, and the onset of crystallization of the solid solution layer of the $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ increases. The lifetime of photocarriers increases from 10^{-7} s up to 5×10^{-5} s when the temperature of the crystallization onset increases from 650°C up to 730°C.

Keywords: heterojunction, solid solution, crystallization temperature, photocurrent, photosensitivity, photoEMF, photoluminescence.

DOI: PACS number(s): 73.40. Lq, 78.20. □ e, 81.05. Hd.

I. Введение

Известно, что широкозонные полупроводниковые соединения A^3B^5 и A^2B^6 являются перспективными материалами для создания оптоэлектронных приборов, работающих в инфракрасной и видимой областях спектра излучения. Проводятся интенсивные исследова-ния по созданию различных электронных приборов на основе GaP, GaAs, CdTe, ZnSe и их твердых растворов [1-4]. Среди этих материалов соединения на базе GaAs представляют особый интерес, поскольку значения подвижностей электронов и дырок в них значительно больше [5], и на их основе могут быть разработаны быстродействующие оптоэлектронные изделия. Кроме того, твердые растворы замещения $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ дают возможность расширить спектральный диапазон функционирования структур на их основе до 400 нм [6, 7]. Однако, использование приборных структур, изготовленных на основе соединения A^3B^5, ограничено, с одной стороны, экономической нецелесообразностью их крупномасштабного использования, с другой стороны, недостаточной изученностью фотоэлектрических свойств таких материалов и гетеропереходов на их основе.

В данной работе представлены результаты исследований некоторых фотоэлектрических свойств гетероперехода *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, который был получен выращиванием эпитаксиальных слоев из твердых растворов $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ на подложке *n*-GaAs, ориентированной по направлению (100).

II. Методикаэксперимента

Выращивание эпитаксиальных слоев осуществляли из ограниченного объема оловянного раствора-расплава на подложке GaAs методом принудительного охлаждения. Толщины полученных пленок изменялись в пределах 10–15 мкм в зависимости от величины зазора между подложками и режима роста. Рентгенограммы слоев $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, снятые на дифрактометре третьего поколения типа Empyrean Malvern PA Nalytical L.T.D, подтвердили, что выращенные слои имеют сфалеритную кристаллическую решетку и отличаются наименьшими механическими напряжениями как в объеме, так и вблизи границы раздела слоев.

Люкс-вольтовые характеристики измеряли на установке, которая может имитировать солнечный свет. В качестве источника излучения использовали вольфрамовую лампу накаливания мощностью 150 Вт. Измерение величины освещенности проводили с помощью цифрового измерителя освещенности MASTKCH LUXMETER MS6610.

Спектральную зависимость фоточувствительности образцов измеряли с помощью оптического спектрометра, оснащенного зеркальным монохроматором фирмы CARLZEISJENA с кварцевой оптикой, что давало возможность исследовать образцы в диапазоне энергии фотонов от 1 до 3 эВ.

Спектры фотолюминесценции образцов исследовали на установке КСВУ-23. Оптическую накачку поверхности эпитаксиального слоя при температуре 300 К осуществляли ртутной лампой, сигнал регистрировали на установке СДЛ-2.

III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Поверхность эпитаксиальних слоев твердых растворов $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ имеет дырочный тип проводимости с холловскими концентрациями носителей $p=5\times10^{17}$ см$^{-3}$. В литературе отмечается, что при обычных условиях проводимость эпитаксиального слоя ZnSe всегда получается *n*-типа из-за эффекта самокомпенсации [8]. Выращенные нами эпитаксиальные пленки с химическим составом $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ имеют *p*-тип проводимости. На основе квантовохимических представлений показана возможность увеличения энергии связи селена в составе гантельной структуры Se-Ge, размещенной в узлах кристаллической решетки твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, по сравнению с узловым положением в кристаллической решетке ZnSe. Это может привести к значительному уменьшению числа вакансий V_{Se}, приводящих обычно к возникновению электронного типа проводимости в ZnSe. Кроме того, часть вакансий в подрешетке селена V_{Se} в твердых растворах может быть занята атомами Ge, что также приводит к уменьшению число вакансий V_{Se}. Предполагается, что возникновение эпитаксиальных слоев твердого раствора типа $(GaAs)_{1-x-y}$ $(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ при формировании гетероструктуры *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ связано с частичным растворением подложки GaAs.

Фотоэлектрические свойства полученных структур изучали как фотовольтаическими, так и фотодиодными способами при температуре 300 K. Поверхность освещали со стороны твердого раствора. Люкс-амперные характеристики структур, полученные при освещении интегральным светом, показали, что зависимость тока короткого замыкания ($I_{кз}$) от освещенности имеет нелинейную зависимость на начальном участке, т.е. увеличение величины падающего света приводит к волнообразному возрастанию $I_{кз}$, что может быть связано с изменениями параметров контактирующих полупроводников под влиянием потока светового излучения (времени жизни неосновных носителей заряда, диффузионной длины (рис. 1)). С ростом интенсивности падающего света ЭДС холостого хода стремится к насыщению, достигая при этом значения 0.6 В, что может быть связано с невозможностью уменьшения толщины переходного слоя между эпитаксиальной пленкой и подложкой под воздействием падающего света.

По спаду релаксации фотоЭДС определено время жизни фотоносителей структур, выращенных при различных условиях. Обнаружено, что с увеличением температуры $T_{нк}$ начала кристаллизации слоя твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x$ $(ZnSe)_y$ время жизни фотоносителей увеличивается от значения 10^{-7} с при $T_{нк}$=650°C до 5×10^{-5} с

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

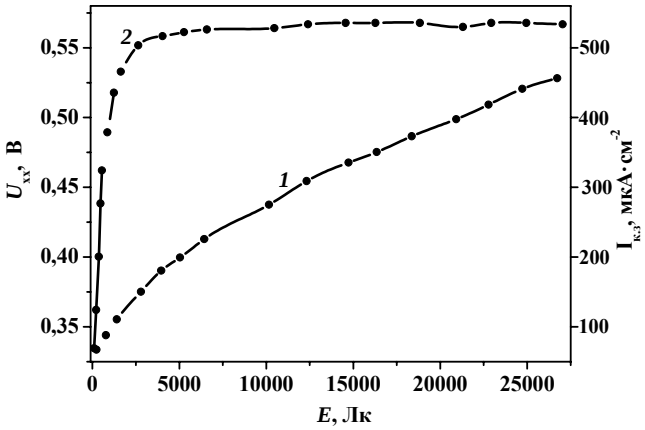


Рисунок 1. Зависимости тока короткого замыкания (*1*) и ЭДС холостого хода (*2*) от освещенности интегральным светом.

при $T_{нк}$=730°С. Были измерены спектральные характеристика $I_{кз}$ и $U_{фхх}$, а также фототока в фотодиодном режиме. Монохроматическое излучение падало со стороны твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$. Измерение спектральной зависимости фототока в фотодиодном режиме (рис. 2), показало, что она охватывает широкий интервал энергий падающих квантов от 1.07 эВ до 3 эВ.

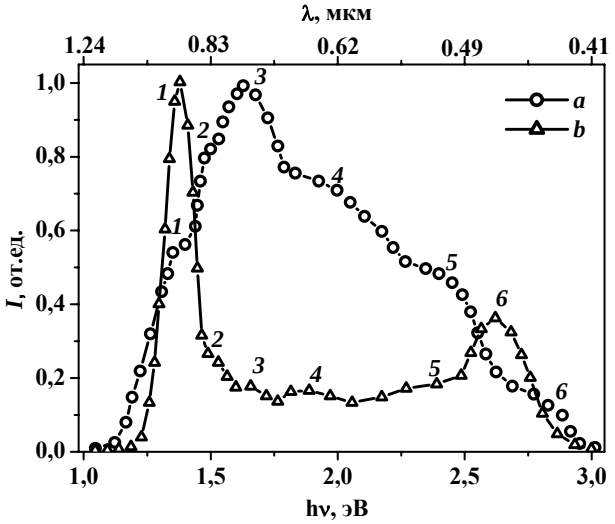


Рисунок 2. Спектральная зависимость фототока структуры *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, получен-ная в фотодиодном режиме при различных температу-рах начала кристаллизации: *a* – $T_{нк}$ = 730°С, *b* – $T_{нк}$ = 650°С.

Из рис. 2 видно, что спектр фоточувствительности гетероструктур в интервале энергий 1–3 эВ характеризуется 6 пиками с максимумами при энергиях фотонов эВ: *1* – 1.37, *2* – 1.47, *3* – 1.65, *4* – 1.88, *5* – 2.3, *6* – 2.62 (рис. 2, кривая а), На кривой б спектр начинается с энергии фотонов 1.07 эВ, возможно, это обусловлено энергией связи парных атомов Ge, частично замещающих некоторые молекулы арсенида галлия и создающих соответствующий энергетический уровень [9]. Кроме того, примесные атомы германия самоорганизуются в нанокристаллиты в дефектоспособных областях арсенид-галлиевой решетки [7], и формируют собственный энергетический уровень акцепторного характера [10]. При энергии фотонов 1.48 эВ наблюдается фотопик, соответствующий рекомбинации из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs [10]. Максимум спектральной зависимости фоточувствительности наблюдается при 1.64 эВ, что, возможно, обусловлено структурной щелью между валентной зоной и изовалентными примесями соединений Ge-Se в слое GaAs [11]. Фотопики (рис. 2, кривая б), соответствующие энергиям фотонов 1.89, 2.18 и 2.67 эВ, возможно, обусловлены соединениями GaSe ($h\nu_{max}$=1.88 эВ), ZnAs ($h\nu_{max}$=2.15 эВ) и ZnSe ($h\nu_{max}$=2.69 эВ) с глубокими уровнями в валентной зоне арсенида галлия [8].

Спектральные зависимости фотоЭДС гетероструктур *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ приведены на рис. 3.

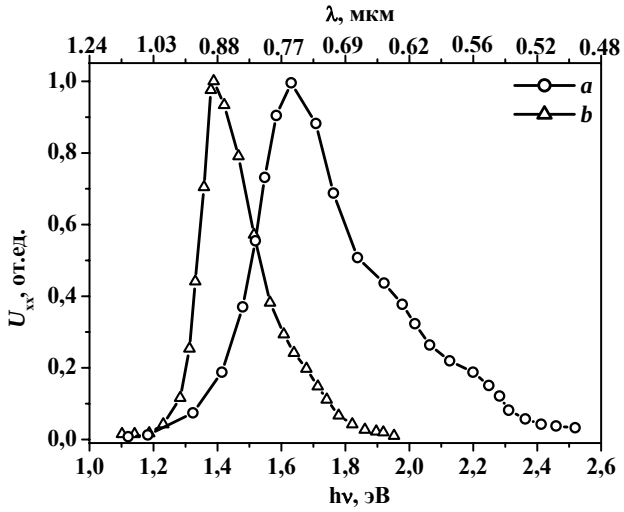


Рисунок 3. Спектральная зависимость фотоЭДС холостого хода структур *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x$ $(ZnSe)_y$, полученных при различных температурах начала кристаллизации: *a* – $T_{нк}$ = 730°С, *b* – $T_{нк}$ = 650°С.

Видно, что максимумы спектральных зависимостей, характеризуемые температурой начала кристаллизации, с увеличением температуры

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

начала кристализации до 730°C смещаются в коротковолновую область длин волн. Поскольку разделение носителей происходит в твердом растворе $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ на *p-n* переходе, то такое смещение, вероятно, связано с уменьшением содержания германия по отношению к ZnSe на границе гетероперехода в твердом растворе и увеличением температуры начала эпитаксии. Хотя излучение падает со стороны твердого раствора, часть носителей, генерированных из поверхности твердого раствора, при больших энергиях падающих фотонов, вероятно, рекомбинируют, не достигая границы *p-n* перехода, где происходит их разделение. Поэтому почти во всех случаях исследования фотоЭДС наблюдается спад фоточувствительности в коротковолновой области спектральной зависимости фотоЭДС. Некоторое различие в значениях фоточувстви-тельности, наблюдаемых в коротковолновой области для различных образцов, можно объяснить различием толщин пленок.

Также проведены исследования фотолюминесценции полученных нами твердых растворов $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ в собственной области спектра. Измерению подвергались образцы, полученные при различных температурах начала кристаллизации. Сканирование образцов осуществляли по поверхности эпитаксиальных слоев. Оптическая накачка поверхности слоев при температуре 300 К осуществлялась ртутной лампой.

При визуальном наблюдении на поверхности эпитаксиальных слоев обнаружено люминесцентное свечение с цветом от зеленого до синего в зависимости от состояния образцов. Сканированием поверхности пленок в различных направлениях также можно было приближенно визуально оценить состояние поверхности образцов по цвету и однородности свечения. В спектрах фотолюминесценции, полученных непрерывной записью (рис. 4*a* и *b*), обнаружено, что максимумы собственных полос фотолюминесценции смещаются в коротковолновую область с увеличением температуры начала кристаллизации.

Исследуя спектр фотолюминесценции твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, обнаружено, что с удалением поверхностных слоев, максимумы собственной полосы смещаются в длинноволновую область (рис. 4, *a′*, *a″* и *b′*). В работе [12] показано, что в твердом растворе содержание селенида цинка вдоль направления роста увеличивается и соответственно увеличивается ширина запрещенной зоны. Таким образом, зависимость ширины запрещенной зоны от состава (германия и селенида цинка в объеме твердого раствора) имеет немонотонный характер, и полученные твердые растворы являются варизонными структурами. Ширины запрещенной зоны, оцененные по спектрам фотолюминесценции для двух указанных образцов, составили 2.51 и 2.21 эВ.

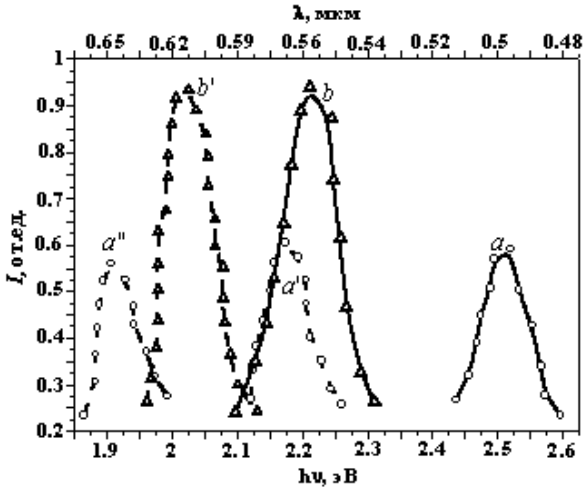


Рисунок 4. Собственная область спектров фотолюминесценции, снятых на поверхности и при последовательном удалении с поверхности эпитаксиальных слоев (*a′*, *a″* и *b′*): *a* – $T_{нк}$ = 730°C, *b* – $T_{нк}$ = 650°C.

IV. Заключение

Таким образом, исследованы фотоэлектрические свойства *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ гетероструктур как в фотодиодном, так и в фотовольтаическом режимах. Выявлено, что спектральная зависимость фототока охватывает широкий интервал энергии падающих квантов от 1.07 эВ до 3 эВ. Показано, что с увеличением температуры начала кристаллизации ($T_{нк}$) максимумы спектральных зависимостей фотоЭДС смещаются в более коротковолновую область длин волн. Обнаружено, что с увеличением температуры начала кристаллизации ($T_{нк}$) слоя твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ время жизни фотоносителей растет от 10^{-7} с при $T_{нк}$=650°C до 5×10^{-5} с при $T_{нк}$=730°C. Исследованием фотолюминесценции на поверхности эпитаксиальных слоев $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ показано, что максимумы собственной полосы фотолюминесценции смещаются в более коротковолновую область с увеличением температуры начала кристаллизации. Также исследования собственной области

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

спектра фотолюминесценции образцов по толщине эпитаксиального слоя подтверждают варизонность полученных структур.

Метаданные

Photoelectrical properties of heterostructures *n*-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$

S.Z. Zainabidinov[1], A.Y. Boboev[1,2], A.J. Akbarov[1]

[1]Andijan State University named after Z.M. Babur, University str. 129, 170100, Andijan, Uzbekistan

[2]Scientific research institute of semiconductors physics and microelectronics of the National University of Uzbekistan, Yangi Olmazor str. 20, 100057, Tashkent, Uzbekistan

It is determined that the spectral dependence of the photocurrent covers a wide range of incident photon energies from 1.07 eV to 3 eV. It is shown that with an increase in the temperature of the onset of crystallization, the maxima of the spectral dependence of the photoEMF shift to a shorter wavelength region, and the onset of crystallization of the solid solution layer of the $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ increases. The lifetime of photocarriers increases from 10^{-7} s up to 5×10^{-5} s when the temperature of the crystallization onset increases from 650°C up to 730°C.

Keywords: heterojunction, solid solution, crystallization temperature, photocurrent, photosensitivity, photoEMF, photoluminescence.

Литература (References)

[1] Wenjin Yang, Baodan Liu, Bing Yang, Jianyu Wang, Takashi Sekiguchi, Staedler Thorsten, Xin Jiang. Advanced Functional Materials **25**, No.17, 2543 (2015).

[2] A.N. Kosarev, V.V. Chaldyshev, V.V. Preobrazhenskij, M.A. Putjato, B.R. Semjagi. Semiconductors **50**, No.11, 1519 (2016).

[3] M. Szot, A. Szczerbakow, K. Dybko, L. Kowalczyk, E. Smajek, V. Domukhovski, E. Łusakowska, P. Dziawa, A. Mycielski, T. Story, M. Bukała, M. Galicka, P. Sankowski, R. Buczko, P. Kacman. Acta Physica Polonica A **116**, No.5, 959 (2009).

[4] A.N. Reznickij, A.A. Klochihin, M.V. Eremenko. Semiconductors **48**, No.3, 345 (2014).

[5] Arsenid Gallija. Poluchenie, Svojstva i Primenenie. Eds.F.P. Kasamanly and D.I. Nacledova (Moscow, Nauka, 1973).

[6] A.S. Saidov, S.Z. Zainabidinov, M.U. Kalanov, A.Y. Boboev, B.R. Kutlimurotov. Applied Solar Energy **51**, No.3, 206 (2015).

[7] S.Z. Zajnabidinov, A.Y. Boboev, Zh.N. Usmonov. Al'ternativnaja Energetika i Ekologija № 10-12, 43 (2019).

[8] S.P. Suprun, V.N. Sherstjakova, E.V. Fedosenko. Semiconductors **43**, No.11, 1570 (2009).

[9] S.S. Hludkov. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta (obshenauchnyj periodicheskij zhurnal) № 285, 84 (2005); S.S. Hludkov, I.A. Prudaev, V.A. Novikov, D.L. Budnitskiy, K.S. Lopatetskaya. Izvectiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy **56**, №12,101 (2013).

[10] I.K. Polushina, V.Ju. Rud', Ju.V. Rud'. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov **33**, No.6, 697 (1999).

[11] D.I. Bletckan, J.J. Madjar, V.N. Kabatcij. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov **40**, No.2, 142 (2006).

[12] A.Sh. Razzakov. Issledovanija uslovij epitaksial'nogo rosta novyh varizonnykh tverdykh rastvorov $(Ge_2)_{1-x}(ZnSe)_x$ i ikh nekotorykh elektricheskikh, fotoelektricheskikh svoistv. Diss. kand. fiz. mat. nauk (Tashkent, FTI, 1998).

n-GaAs-*p*-$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ гетеротузилмаларининг фотоэлектрик хоссалари

С.З. Зайнабидинов[1], А.Й. Бобоев[1,2], А.Ж. Акбаров[1]

[1]З.М. Бобур номидаги Андижон давлат университети. 100170, Ўзбекистон, Андижон шаҳри, Университет кўчаси 129-уй.

[2]Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй, 100057, Тошкент, Ўзбекистон

Фототокнинг спектрал боғланиши 1.07 эВ дан 3 эВ гача тушувчи квант энергиясининг кенг соҳасини қамраб олиши аниқланди. Кристалланиш ҳарорати ортиши билан фотоЭЮК спектрал боғланиш максимуми нисбатан тўлқин узинлиги қисқа тўлқинлар соҳаси тамон силжигани, шунингдек, $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмали қатлам даслабки кристалланиш ҳарорати $T_{нк}$=650°C дан $T_{нк}$=730°C гача ортирилганда, фототок ташувчиларнинг яшаш вақти 10^{-7} с дан 5×10^{-5}с гача ортганлиги кўрсатилди.

Калит сўзлар: гетероўтиш, қаттиқ қоришма, ҳарорат кристалланиш, фототок, фотосезгирлик, фотоЭЮК, фотолюминесценция.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.