

ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В НАНОЧАСТИЦАХ InSe, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

В.М.САЛМАНОВ¹, А.Г.ГУСЕЙНОВ¹, Г.Б.ИБРАГИМОВ², М.Б.ДЖАФАРОВ³,
Р.М.МАМЕДОВ¹, Т.А.МАМЕДОВА¹, Ф.Ш.АХМЕДОВА¹

*Бакинский Государственный Университет¹
AZ1148, Азербайджан, г.Баку, ул. З.Халилова, 23
Министерство науки и образования, Институт Физики²
AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131
Азербайджанский Гянджинский Технологический Университет³
AZ2011, Азербайджан, Гянджа, пр. Ш.И.Хатаи, 103
vagif_salmanov@yahoo.com*

Получена: 17.04.2024

Принята к печати: 02.10.2024

РЕФЕРАТ

Экспериментально исследовались наночастицы InSe, полученные взаимодействием лазерного излучения с элементом In и раствором SeO₂. В качестве источника излучения использовался импульсный Nd:YAG-лазер с длиной волны $\lambda=1064\text{нм}$, с длительностью 10нс и с энергией 135мДж в импульсе. В коллоидном растворе наблюдалось образование наночастиц диаметром от 7 до 30нм. При помощи дифракционного анализа рентгеновских лучей, сканирующего электронного микроскопа, атомного силового микроскопа и спектроскопии дисперсной энергии рентгеновских лучей проведены исследования внутреннего строения и структуры полученных образцов. Показано, что наблюдаемые особенности в спектрах люминесценции наночастиц InSe обусловлены коллективным взаимодействием экситонов. При высоких уровнях оптического возбуждения в наночастицах InSe обнаружено стимулированное излучение.

Ключевые слова: наночастицы InSe, лазерная абляция, поглощение, вынужденное излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Получение и исследование наноструктур на основе малоизученных и, в то же время, наиболее перспективных полупроводниковых соединений селенида индия (InSe) благодаря его большой нелинейной восприимчивости, высокой подвижности электронов и прямой оптической запрещенной зоне открывает большие возможности применения их в нелинейной оптике, быстродействующей электронике и в солнечных элементах [1-16]. Одним из наиболее распространенных методов получения полупроводниковых наночастиц является импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердых мишеней, находящихся в вакууме или в окру-

жающем газе, либо в жидкости [17-20]. Лазерная абляция это довольно простой, быстрый и прямой способ синтеза наночастиц. В этом методе не требуется больших времен для проведения химических реакций, а также высоких температур и давления или многоступенчатых процессов, характерных для химического синтеза. Метод ИЛА применим практически к неограниченной комбинации материалов мишенной и жидкостей, что позволяет осуществлять синтез НЧ-форма, размер, распределение по размерам, состав и структура, зависящих от параметров лазера, используемого для абляции (длины волны излучения, длительности и частоты следования импульсов, энергии в импульсе), а также от условий окружения (ваку-

ум, фиксированное давление газа, либо жидкость). Следует отметить, при лазерной абляции, как правило, используют полупроводниковые кристаллы, выращенные различными методами (Бриджмена, зонной плавки, Чохральского и т.д.), что отнюдь не является простой технологической задачей, связанной с высокой температурой (~ 1000 °С), неконтролируемыми примесями, дефектами, большой тратой времени (иногда несколько суток), многочисленным техническим оборудованием и т.д.).

Нами предлагается совершенно иной метод синтеза наночастиц с использованием элементов, составляющих компоненты исходного вещества в соответствующем растворе. Как показали проведенные нами экспериментальные исследования, структурные характеристики и оптические свойства наночастиц, полученных этим способом, значительно превосходят аналогичные характеристики наночастиц, полученных из объемных кристаллов. Данная работа посвящена синтезированию наночастиц InSe лазерной абляцией атомов In в растворе SeO₂.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наночастицы InSe были синтезированы путем лазерной абляции твердой мишени в жидкой среде. В качестве первоначального сырья были использованы особо чистый In (99%) в растворе SeO₂. Реакция происходила по нижеприведенной формуле:



В качестве источника излучения использовался импульсный Nd:YAG-лазер со встроенными генераторами 2-й и 3-й гармоник, предназначенный для генерации излучения с длиной волны 1064, 532 и 335 нм. Длительность лазерного импульса составляла 10 нс, частоты следования импульсов 10 Гц, максимальная мощность ~ 12 МВт/см². Интенсивность излучения изменялась при помощи калиброванных нейтральных световых фильтров. Спектры оптического поглощения и люминесценции наночастиц InSe исследовались с ис-

пользованием автоматического монохроматора М833 с двойной дисперсией (спектральное разрешение $\sim 0,024$ нм на длине волны 600 нм), с компьютерным управлением и детектором, регистрирующим излучение в диапазоне длин волн 350-2000 нм.

Лазерное излучение, сфокусированное положительной линзой ($f=11$ см), использовали для абляции наночастиц InSe (Рис. 1а).

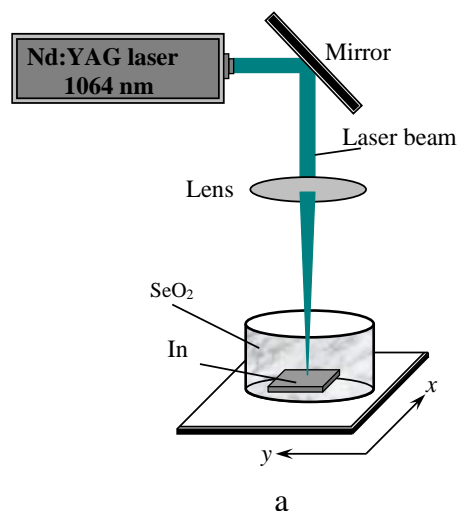


Рис.1

а - схема экспериментальной установки для абляции наночастиц InSe, б - коллоидный раствор InSe, полученный методом лазерной абляции в жидкой среде.

Лазерная абляция кристалла InSe проводилась в кварцевой кювете, содержащей чистый In и 5 мл раствора SeO₂ без добавления каких-либо поверхностно-активных веществ. Процесс абляции проводили лазерным излучением с длиной волны $\lambda=1064$ нм, с энергией в импульсе 135 мДж в течение ~ 10 мин.

На Рис.1b показана фотография коллоидного раствора InSe, полученного методом лазерной абляции. Как видно из рисунка, цвет коллоидного раствора является светло-оранжевым, тогда как кристаллы InSe имели темно-серый цвет.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.2 приведена дифрактограмма (XRD) наночастиц InSe из капель коллоидного

раствора, высушенных на стеклянной подложке. В качестве источника излучения были использованы $\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1,544178\text{\AA}$ SSFOM: F17-610.0.5.10.60. Рентгеноструктурным анализом установлено, что наночастицы InSe имеют гексагональную структуру.

В Таблице приведены положения (2θ) пиков дифрактограммы наночастиц InSe. Идентификация дифракционных линий для наночастиц InSe, полученных нами и представленных в работе [21], находятся в удовлетворительном соответствии.

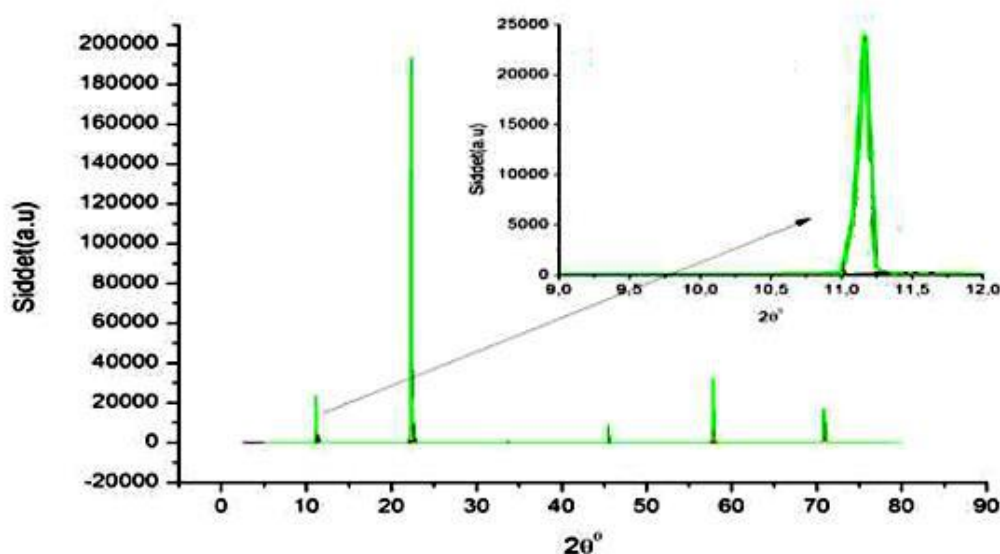


Рис.2

Дифрактограммы (XRD) наночастиц InSe.

Таблица

Положения (2θ) пиков дифрактограммы наночастиц InSe.

2θ	d(A)	BG	Height	I%	Area	I%	FWHM	XS(A)
11,060	7,9935	43	6844	18,1	59049	10,7	0,147	744
16,603	5,3349	32	71	0,2	1652	0,3	0,396	210
22,259	3,9904	67	37912	100,0	554108	100,0	0,248	356
28,473	3,1322	33	48	0,1	934	0,2	0,331	260
33,658	2,6606	23	807	2,1	6937	1,3	0,146	779
39,503	2,2794	14	49	0,1	759	0,1	0,263	346
45,420	1,9952	27	5540	14,6	56795	10,2	0,174	603
57,721	1,5958	84	19737	52,1	174802	31,5	0,151	806
58,617	1,5736	35	103	0,3	1569	0,3	0,259	381
70,817	1,3294	76	15633	41,2	142057	25,6	0,154	828
71,801	1,3136	46	69	0,2	1232	0,2	0,304	342

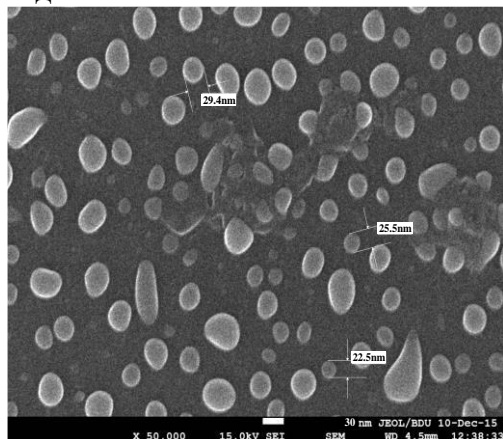
На основе рентгенограмм при помощи формулы Дебая-Шерера [22] были вычислены размеры полученных наночастиц

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2)$$

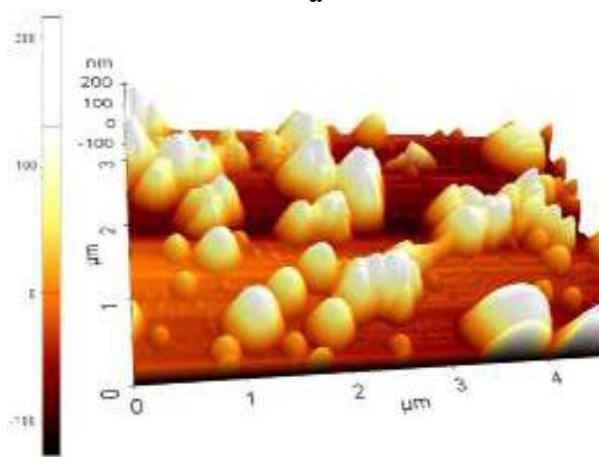
где D - размеры наночастиц, $k=0,9$ - фактор формы линии (shape factor), $\beta=0,035\text{\AA}$ - полуширина максимума интенсивности (FWHM - Full Width at Half Maximum), λ - длина волны рентгеновского излучения ($\lambda=1,54\text{\AA}$), θ - угол Брегга ($\cos \theta=0,727$).

Оценки показывают, что размеры наночастиц InSe изменяются в интервале $\sim(7\div30)\text{нм}$.

На Рис.3 представлены SEM (a) и AFM (b) изображения наночастиц InSe на стеклянной подложке.



a



b

Рис.3

SEM (a) и AFM (b) изображения наночастиц InSe на стеклянной подложке.

Изображения, полученные с помощью SEM, показывают, что полученные вещества состоят из сферических нанокристаллов с размерами $\sim(7-30)\text{нм}$, которые собираются в полидисперсивной форме. Гомогенного распределения частиц на представленном изображении AFM не наблюдается. Анализ структуры наночастиц InSe методом спектроскопии дисперсной энергии рентгеновских лучей (EDAX) показывает, что отношение индия к селену составляет In:Se=1:1, показывая, что состав вещества находится в стехиометрическом соотношении (Рис.4).

Кривая поглощения наночастиц InSe представлена на Рис.5a. Из зависимости $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ была определена ширина запрещенной зоны исследованных образцов, которая оказалась равной $E_g=2.15\text{эВ}$ (Рис. 5b). Эта величина на 0.9эВ больше ширины запрещенной зоны объемного материала ($E_g=1,25\text{эВ}$) [23].

Спектры люминесценции наночастиц InSe, возбуждаемые второй гармоникой Nd:YAG-лазера ($\hbar\omega = 2,34\text{эВ}$), представлены на Рис.6a. Как видно из рисунка, в спектре наблюдаются две линии излучения с максимумами 587нм (линия A) и 592нм (линия L). С ростом интенсивности возбуждения L линия становится доминирующей в спектре излучения. При мощности накачки $10\text{МВт}/\text{см}^2$ интенсивность L линии на 2 порядка превышает интенсивность A-линии. Следует отметить, что в зависимости от интенсивности возбуждения положение L-линии меняется, наблюдается ее смещение в сторону длинных волн. При мощности лазерного излучения $\sim 8\text{МВт}/\text{см}^2$ смещение L-линии составляет $\sim 15\text{мэВ}$.

На Рис. 6b представлены зависимости интенсивности люминесценции A-линии и L-линии от мощности лазерного излучения. Как видно из рисунка, интенсивность A-линии линейно зависит от мощности лазера, тогда как для L-линии линейная зависимость, наблюдаемая при низких уровнях возбуждения заменяется на квадратичную при высоких уровнях возбуждения. По-нашему мнению, такая суперлинейная зависимость свидетельствует о наблюдении явления вынужденного излучения в наночастицах InSe.

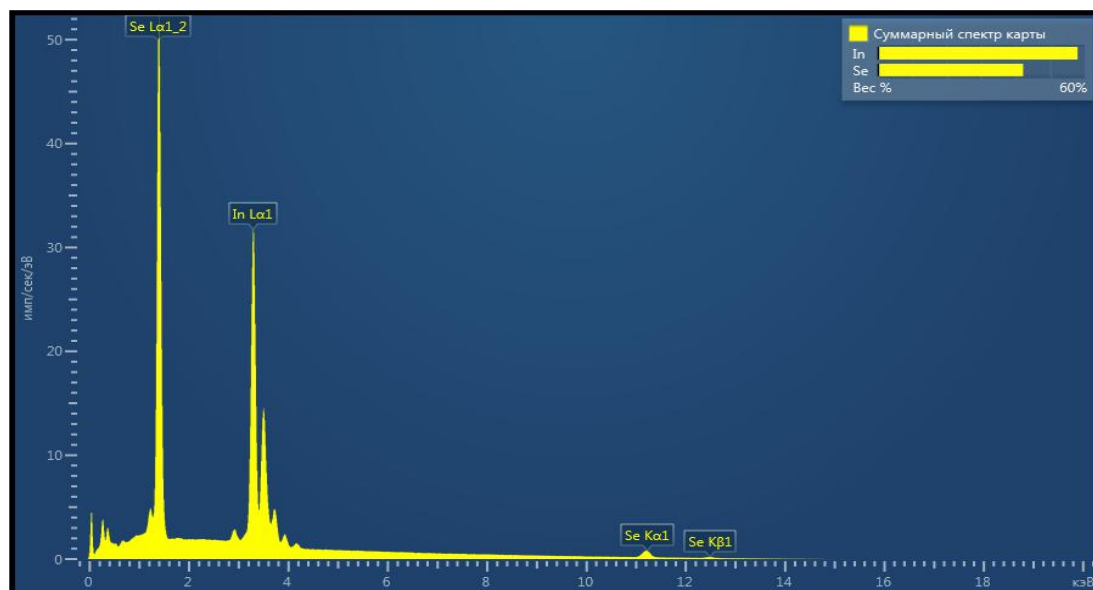


Рис.4

EDAX-изображения наночастиц InSe.

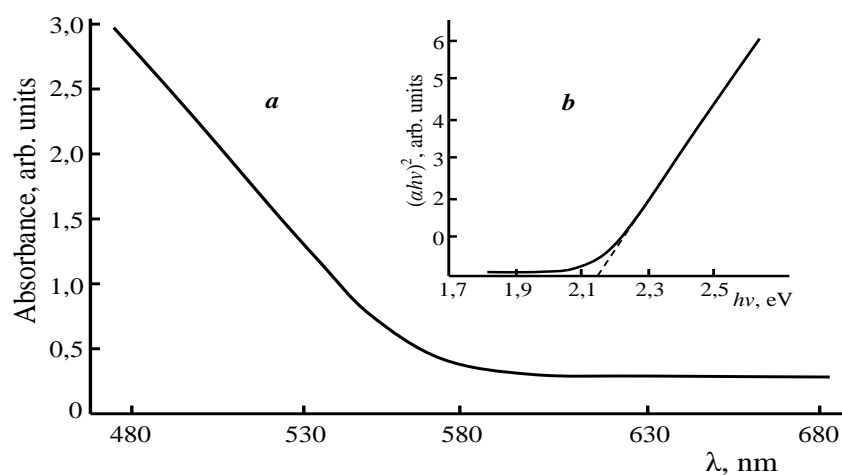


Рис.5

Спектр поглощения (a) и зависимость $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ (b) наночастиц InSe.

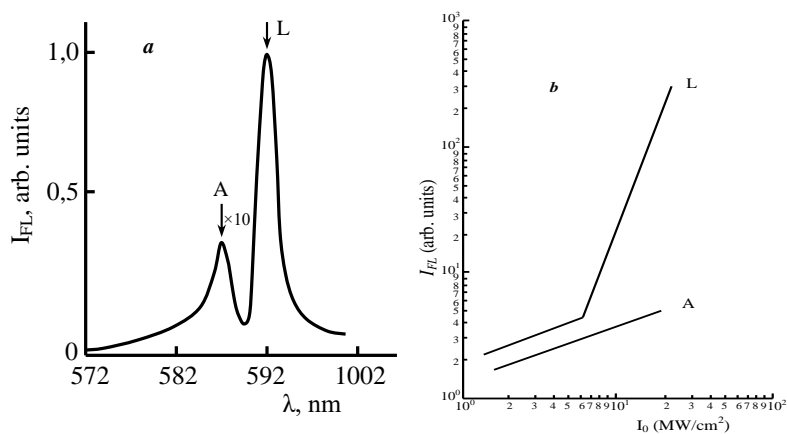


Рис.6

Спектры люминесценции наночастиц InSe, возбуждаемой второй гармоникой Nd:YAG- лазера ($\hbar\omega = 2,34$ эВ) (a), зависимости интенсивности люминесценции А- линии и L-линии от мощности лазерного излучения (b).

Сравнение спектра люминесценции наночастиц со спектром поглощения InSe позволяет предположить, что А-линия, наблюдаемая в спектре люминесценции, обусловлена аннигиляцией свободных экситонов. Об этом свидетельствует его стабильность, узкая ширина ($\sim 10\text{\AA}$) и расположение этой линии в длинноволновой области спектра от края фундаментальной полосы поглощения на величину, равной энергии связи экситонов в InSe ($E_{\text{св.}}=20\text{мэВ}$).

Наибольший интерес вызывает природа L-полосы, на которой происходит вынужденное излучение. По-нашему мнению, эта полоса связана с экситон-экситонным взаимодействием, возникающим в полупроводниках при высоких уровнях оптического возбуждения [23-25]. Действительно, при возбуждении наночастиц InSe лазерным излучением электроны и дырки связываются в экситоны. В дальнейшем с увеличением интенсивности возбуждения плотность экситонов растет, и при ее достижении некоторого критического значения происходит взаимодействие между экситонами, что приводит к распаду экситонов и образованию свободных электронно-дырочных пар. Этот фазовый переход называется критерием Мотта для экситонов. Зная эффективные массы электронов и дырок ($m_e=0.12m_0$, $m_h=0.6m_0$), а также боровский радиус экситона $a_{\text{экс.}}=37\text{\AA}$ для InSe, можно определить концентрацию экситонов ($n_{\text{Мотт}}$), при которой происходит взаимодействие экситонов

$$n_{\text{Мотт}} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1,46}{4a_{\text{экс.}}} \frac{m_0}{m_e + m_h} \right)^3. \quad (3)$$

Критическая концентрация экситонов для InSe, вычисленная по формуле (3), оказалась равной $n_{\text{Мотт}} \sim 2,5 \times 10^{16} \text{см}^{-3}$. Оценки показывают, что плотность неравновесных носителей, создаваемых лазером с интенсивностью $I_0=1,5 \times 10^{25} \text{фотон/см}^2 \cdot \text{с}$ и длительностью $\Delta t=3 \times 10^{-9} \text{с}$ равна

$$\Delta n = \alpha I_0 \Delta t = 4,5 \times 10^{19} \text{см}^{-3}, \quad (4)$$

где $\alpha \approx 10^3 \text{см}^{-3}$, коэффициент поглощения на

краю собственного поглощения.

Как видно из сравнения формул (3) и (4), полученные нами значения концентрации неравновесных носителей превышают экситонную плотность, необходимую для моттовского перехода.

Экситон-экситонное взаимодействие может быть описано следующей формулой [26]

$$h\nu = E_g - 2E_b - E_k E_k' - \frac{\hbar k^2}{2\mu} = E_g - 2E_{\text{св}} - \Delta E, \quad (5)$$

где E_g - ширина запрещенной зоны, $\mu = \left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right)^{-1}$ - приведенная эффективная

масса электрон-дырочных пар, $\frac{\hbar^2 k^2}{2M}$ - суммарная кинетическая энергия электрон-дырочных пар, $M = m_e + m_h$, $E_{\text{св}}$ - энергия связи экситона, $\hbar k_{\text{нач.}}(кон.)$ - момент электрона перед (после) соударения, $E_{kk'}$ - кинетическая энергия экситонов перед соударением. $\Delta E'$ определяется по формуле

$$\Delta E = \frac{1}{\mu} \frac{\hbar^2}{8} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где N/V - темп генерации свободных носителей в единице объема.

Эксперименты показывают, что зависимость ΔE от интенсивности возбуждения носит характер $\Delta E' \sim I_0^{1/3}$.

Оценки по формуле (6), показывают, что при значении $m_e=0.12m_0$, $m_h=0.6m_0$ и $I_{\text{лазер}} \approx 10 \text{МВт/см}^2$, ΔE равен $\sim 15 \text{мэВ}$, что сравнимо с экспериментально найденными значениями для ΔE . На основании вышеизложенного, можно утверждать, линия L, доминирующая в спектре люминесценции наночастиц InSe обусловлена экситон-экситонным взаимодействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом лазерной абляции атомов In с жидким раствором SeO_2 синтезированы наночастицы InSe с размерами 7-30нм. Ширина запрещенной зоны наночастицы InSe,

вычисленная из зависимости $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ оказалась равной $E_g=2.15\text{эВ}$. В спектрах люминесценции наночастиц InSe, возбуждаемых второй гармоникой Nd:YAG-лазера ($\hbar\omega = 2,34\text{эВ}$), наряду с излучением свободных экситонов ($\lambda=587\text{нм}$) также наблюдается длинноволновое излучение с максимумом

$\lambda=592\text{нм}$, связанное с взаимодействием экситонов. Интенсивность длинноволнового излучения на два порядка превышает интенсивности излучения свободных экситонов. Суперлинейная зависимость в спектрах люминесценции свидетельствует о наличии вынужденного излучения в наночастицах InSe.

1. Г.А.Ахундов, В.М.Салманов, А.А.Агаева, Г.Л.Беленький. *Исследование быстрого канала рекомбинации в InSe при возбуждении светом неодимового лазера, Известия ВУЗ СССР*, **7** (1972) 127-130.
2. Г.А.Ахундов, В.М.Салманов, А.А.Агаева, И.Д.Ярошецкий. *Генерация второй гармоники в соединениях $A^{III}B^{VI}$, ФТП*, **7** (1973) 1229-1232.
3. Г.А.Ахундов, В.М.Салманов, А.А.Агаева, И.Д.Ярошецкий. *Определение сечения поглощения света неравновесными носителями, созданными рубиновым лазером в кристаллах селенида индия, ФТП*, **7** (1973) 2225-2228.
4. В.М.Салманов, Д.П.Дворников, И.Д.Ярошецкий. *Наблюдение резонансного излучения в области сплошного спектра полупроводников, Письма в ЖЭТФ*, **20** (1974) 17-21.
5. В.М.Салманов, А.А.Агасиев, А.Х.Зейналлы, М.А.Собеих, В.И.Тагиров. *Получение и исследование люминесценции пленок InSe под действием лазерного излучения, Изв. ВУЗ СССР*, **1** (1978) 126-131.
6. Г.Б.Абдуллаев, В.М.Салманов, В.И.Тагиров, А.Г.Казым-заде, М.М.Панахов. *Особенности фотопроводимости анизотропных кристаллов InSe, ФТП*, **14** (1980) 1842-1846.
7. Г.Б.Абдуллаев, В.М.Салманов, В.И.Тагиров, А.Г.Казым-заде, М.М.Панахов. *Внутризонное поглощение света монокристаллами InSe, индуцированное излучением рубинового лазера, ФТТ*, **23** (1981) 3452-3455.
8. H.Bidadi, M.Kalafi, H.Tajalli, V.M.Salmanov. *Exciton absorption in InSe crystals at picosecond excitation. Indian journal of physics*, **68A** (1994) 539-546.
9. А.Г.Казым-заде, В.М.Салманов, А.А.Агаева. *Детекторы оптического излучения на основе слоистых кристаллов GaSe и InSe, ЖТФ*, **77** (2007) 1325-1327.
10. А.Г.Казым-заде, В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Л.Г.Гасанова, Р.М.Мамедов. *Оптические нелинейности в кристаллах GaSe и InSe при лазерном возбуждении, Оптика и спектроскопия*, **116** (4) (2014) 130-134.
11. A.H.Kyazym-zade, V.M.Salmanov, M.Karabulur, A.Dincher, A.H.Huseynov, M.A.Dzhafarov. *Structure, optical and luminescent properties of GaSe and InSe nanoparticles. Journal of Current Research. USA*, **7** (2015) 18321-18326.
12. А.Г.Казым-заде, В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов, А.А.Салманова, Ф.Ш.Ахмедова. *Особенности оптического поглощения и фотопроводимости моноселенида индия при лазерном возбуждении, Известия ВУЗов, Томск*, **60** (10) (2017), 30-33.
13. А.Г.Казым-заде, В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов, З.А.Агамалиев, А.А.Салманова, Ф.Ш.Ахмедова. *Инверсия типа проводимости тонких пленок n-InSe под действием лазерного излучения, ЖТФ*, **89** (2019) 599-562.
14. З.Д.Ковалюк. *Моноселенид индия - революция в нанoeлектронике*; www.2geek.ru/news/336.
15. N.Balakrishnan, Z.R.Kudrynskiy, E.F.Smith, M.W.Fay, O.Makarovskiy, Z.D.Kovalyuk, L.Eaves, P.H.Beton, A.Patanè. *Engineering p-n junctions and bandgap tuning of InSe nanolayers by controlled oxidation, IOP Publishing Ltd 2D Materials*, **4** №2 (2017) 025043-0250047.
16. D.A.Bandurin, A.V.Tyurnina, G.L.Yu, A.Mishchenko, V.Zólyomi, S.V.Morozov, R.K.Kumar, R.V.Gorbachev, Z.R.Kudrynskiy, S.Pezzini, Z.D.Kovalyuk, U.Zeitler, K.S.Novoselov, A.Patanè, L.Eaves, I.V.Grigorieva, V.I.Fal'ko, A.K.Geim, Y.Cao. *High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe, Nature Nanotechnology*, **3** (2016) 223-227.
17. G.N.Makarov. *Application of lasers in nanotechnology: production of nanoparticles and nanostructures by laser ablation and laser nanolithography, Advances in Physical Sciences*, **183** (2013) 673-677.
18. C.W.Yang. *Laser ablation in liquids: Applications*

- in the synthesis of nanocrystals, Progress in Material Science*, **52** (2007) 648-651.
19. N.G.Semaltianos. *Nanoparticles by Laser Ablation. Critical Reviews in Solid State and Material Science*, **35** (2010) 105-109.
20. B.N.Chichkov. *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. Nanoparticles by Laser Ablation, Applied Physics A*, **63** (1996) 109-112.
21. S.I.Drapak, S.V.Gavrilyuk, Z.D.Kovalyuk, O.I.Litvin. *Intrinsic oxide that appears on the surface of a gallium selenide chip as a result of long-term storage, Applied Physics*, **1** (2011), 115-120.
22. S.S.Mao. *Nanolasers: Lasing from nanoscale quantum wires, Int. J. of Nanotechnology*, **1** (2004) 42-46.
23. A.Frova, Ph.Schmid, A.Grisel, F.Levi. *Anisotropic thermal conductivity of layered indium selenide, Sol. Stat. Commun.*, **23** (1977) 45-51.
24. В.Л.Бакуменко, З.Д.Ковалюк, Л.Н.Курбатов, В.Ф.Чишко. *Оптические свойства монокристаллов InSe в области края фундаментального поглощения, ФТП*, **10** (1976) 1045-1051.
25. L.Pavesi, J.L.Staehli, V.Capozzi. *Mott transition of the excitons in GaSe. Phys. Rev. B*, **39** (1989) 10982-10987.
26. G.Micocci, A.Rizzo, P.Siciliano, A.Tepore. *Deep level transient spectroscopy measurements in InSe single crystals Phys. Stat. Sol (a)*, **114** (1989) 253-257.

LAZER ABLYASIYA ÜSULİ İLƏ ALINMIŞ InSe NANOZƏRRƏZİKLƏRİNDƏ OPTİK UDMA VƏ LÜMİNESSENSİYA HADİSƏLƏRİ

V.M.SALMANOV, Ə.H.HÜSEYNOV, H.B.İBRAHİMOV, M.B. CƏFƏROV, R.M.MƏMMƏDOV,
T.A. MƏMMƏDOVA, F.Ş.ƏHMƏDOVA

In atomları və SeO₂ məhlullarının lazer şüaları ilə qarşılıqlı təsiri ilə ölçüləri 7-30nm intervalında olan InSe nanozərrəcikləri təcrübə olaraq sintez edilmişdir. Şüa mənbəyi olaraq dalğa uzunluğu 1064 nm, enerjisi 135 mJ, impulsunun müddəti 10 ns olan Nd:YAG lazerindən istifadə olunmuşdur. Rentgen şüalarının difraksiya analizi, scanedic elektron mikroskopu, atom qüvvə mikroskopu və rentgen şüalarının dispers enerjisinin spektroskopiyası vasitəsilə nanozərrəciklərin səth morfolojiyası və quruluşu tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, InSe nanozərrəciklərinin lüminessensiya spektrində müşahidə olunan xüsusiyyətlər eksitonların qarşılıqlı təsiri ilə əlaqədardır. Yüksək optik həyəcanlaşmada InSe nanozərrəciklərində məcburi şüalanma effekti aşkar edilmişdir.

OPTICAL ABSORPTION AND LUMINESCENCE IN InSe NANOPARTICLES OBTAINED BY LASER ABLATION

V.M.SALMANOV, A.G.GUSEYNOV, I.B.IBRAHIMOV, M.B.JAFAROV, R.M.MAMEDOV,
T.A.MAMEDOVA, F.Sh.AKHMEDOVA

InSe nanoparticles obtained by interaction of laser radiation with the In element and a SeO₂ solution were experimentally studied. A pulsed Nd:YAG laser with a wavelength of $\lambda=1064\text{nm}$, a duration of 10ns, and an energy of 135mJ per pulse was used as a radiation source. In the colloidal solution the formation of nanoparticles with a diameter from 7 to 30nm was observed. Using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscope, atomic force microscope and X-ray dispersed energy spectroscopy, studies of the internal structure and structure of the obtained samples were carried out. It was shown that the observed features in the luminescence spectra of InSe nanoparticles were due to the collective interaction of excitons. At high levels of optical excitation, stimulated emission was detected in InSe nanoparticles.