

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 541.124; 541.14; 541.17; 544.22.022; 544.431.124; 644.3.03

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.004

**ОСОБЕННОСТИ В СПЕКТРАХ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ β -PbN₆****Фёдор Иванович Иванов^{1†}, Юрий Александрович Захаров², Елена Васильевна Исакова³**^{1, 3} Кузбасский гуманитарно-педагогический институт ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Циолковского, 23, 654041, Новокузнецк, Россия² Институт углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, пр. Советский, 18, 650000, Кемерово, Россия¹ ifi3@yandex.ru[†]² zaharov@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8141-7873>³ iselva@yandex.ru

Аннотация. На разработанной микроспектрофотометрической установке, реализующей принцип неподвижности нитевидного кристалла (НК) в оптическом тракте, проводились измерения спектров поглощения, на одном и том же участке кристалла, как в режиме фотохимического разложения (ФХР), так и при действии сильного электрического поля в вакуумном микрокриостате, находящемся на оптической оси, при температурах от жидкого азота до 600 К. Установлено ряд особенностей, зависящих как от толщины НК β -азид свинца (β -PbN₆) так и спектрального режима фотометрирования. При фотометрировании из области ультрафиолета в инфракрасную область при длинах волн 490 нм и выше наблюдается отрицательное поглощение (люминесценция), отсутствующая при спектрофотометрировании из инфракрасной области. Подтверждена выполнимость закона Бугера для длин волн, при которых наблюдается проявление центров окраски. Доказано объемное распределение центров поглощения. Исследовано влияние температуры, деформации, фото- и электрополевого воздействия на спектры поглощения света поляризованного во взаимноперпендикулярных плоскостях $E_{||}[010]$ и $E_{\perp}[010]$. Установлен термический коэффициент изменения ширины запрещенной зоны (ЗЗ) НК β -PbN₆ и определена её ширина, которая практически совпадает с шириной ЗЗ определенной ранее в α -азиде свинца. Доказана собственно дефектная природа центров фундаментального поглощения в области 367-375 нм.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы азид свинца (НК β -PbN₆), спектр поглощения, поляризованный свет, влияние температуры, деформации, центры окраски при фото- и электрополевым разложением.

Для цитирования: Иванов Ф.И., Захаров Ю.А., Исакова Е.В. Особенности в спектрах оптического поглощения нитевидных кристаллов β -PbN₆ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 1. С. 32–40. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.004.

Original article

**FEATURES IN THE SPECTRA OPTICAL ABSORPTION
OF FILAMENTOUS CRYSTALS β -PbN₆****Fedor I. Ivanov^{1†}, Yuri A. Zakharov², Elena V. Isakova³**^{1, 3} Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of Kemerovo State University, Tsiolkovsky Str., 23, Novokuznetsk, 654041, Russia² Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials Science of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Sovetsky Pr., 18, Kemerovo, 650000, Russia¹ ifi3@yandex.ru[†]² zaharov@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8141-7873>³ iselva@yandex.ru

Abstract. At the developed microspectrophotometric installation, which implements the principle of immobility of a filamentous crystal (FC) in the optical path, absorption spectra were measured at the same crystal site, both in the photochemical decomposition (PCD) mode and under the action of a strong electric field in a vacuum microcryostat located on the optical axis, at temperatures from liquid nitrogen to 600 K. A number of features were established, depending on both the thickness of the NK β -azide of lead ($\beta\text{-PbN}_6$) and spectral mode of photometry. When photometry from the ultraviolet region to the infrared region at wavelengths of 490 nm and above, negative absorption (luminescence) is observed, which is absent in spectrophotometry from the infrared region. The feasibility of Buger's law for wavelengths at which the manifestation of the centers of color is observed has been confirmed. The volumetric distribution of absorption centers has been proven. The influence of temperature, deformation, photo- and electrofield effects on the absorption spectra of light polarized in mutually perpendicular planes $E_{\parallel}[010]$ and $E_{\perp}[010]$. The thermal coefficient of change in the width of the band gap zone (GZ) of NK ($\beta\text{-PbN}_6$) was established and its width was determined, which practically coincides with the width of the GZ determined earlier in α -azide of lead). The actual defective nature of the centers of fundamental absorption in the region of 367-375 nm was proved.

Keywords: thread-like crystals of lead azide (FC $\beta\text{-PbN}_6$), absorption spectrum, polarized light, influence of temperature, deformations, centers of color during photo- and electrofield decomposition.

For citation: Ivanov, F. I., Zakharov, Yu. A. & Isakova, E. V. (2022). Features in the spectra optical absorption of filamentous crystals $\beta\text{-PbN}_6$. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 32–40. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.004.

Введение

Ранее полученные экспериментальные результаты, характеризующие оптические свойства и природу центров поглощения и фотопроводимости азидов свинца, приведенные в [1, 2], являются многоплановыми как по объектам (пленки, прессованные образцы, монокристаллы), так и по теоретическому рассмотрению, тем не менее, они позволили выявить ряд общих закономерностей касающихся наличия начального участка сильного поглощения в области длин волн 400–420 нм, а также центров, ответственных за уровни захвата и рекомбинации, зависящих от способа приготовления, допирования и глубины разложения образцов. Теоретическое рассмотрение энергетической структуры ряда полос поглощения, связи со спецификой изучаемых объектов, остаётся до настоящего времени весьма дискуссионным. Перспективными для унификации рассматриваемых результатов в спектрах поглощения является изучение идеальных объектов – нитевидных кристаллов $\beta\text{-PbN}_6$ [3].

Аппаратура и объекты исследований

Совершенные нитевидные кристаллы азидов тяжелых металлов, выращивались по методике [3]. Для спектрофотометрических измерений оптической плотности нитевидных кристаллов была сконструирована микроспектрофотометрическая установка, в которой реализован принцип [4] неподвижности НК в оптическом тракте, позволяющая проводить изме-

рения на одном и том же участке кристалла как в режиме фотохимического разложения (ФХР), так и при действии сильного электрического поля. Использование вакуумного микрокриостата, находящегося на оптической оси, расширило экспериментальные возможности установки от температуры жидкого азота до 600 К.

Блок-схема установки показана на рис.1. Основными рабочими элементами установки являются: монохроматор, вакуумный пост, криостат, микроспектрофотометрическая приставка для регистрации спектров поглощения и задатчик скорости нагрева криостата, в котором предусмотрена возможность термостатирования.

Конструкция вакуумированного криостата позволяет не только исследовать ФХР НК АТМ светом требуемой длины волны и при заданной температуре, но и проводить электрометрические измерения и изучать поведение НК в сильных электрических полях. Для этой цели криостат снабжен электрометрическим вводом на сапфировом изоляторе и высоковольтными вакуумными вводами. Держатель для НК также позволяет компенсировать механические напряжения, возникающие при нагревании.

Многочисленные измерения спектров поглощения свежесинтезированных НК $\beta\text{-PbN}_6$ позволили установить ряд особенностей, зависящих от их толщины и спектрального режима фотометрирования. На рис.2 представлен спектр поглощения (СП) НК $\beta\text{-PbN}_6$. Кривая 1 соответствует СП, снятому при изменении длины волны из области ультрафиолетового в область красного поглощения; кривая 2 снята при измене-

нии длины волны в обратном направлении. На кривой 1 в области длин волн 490 нм и выше наблюдается отрицательное поглощение (люминесценция), отсутствующее, если спектрофотометрирование проводилось со стороны длинных волн. Красная граница возбуждения люминесценции для отдельных НК β -PbN₆ размыта и, как правило, проявляется в области 390-410 нм, т.е. в области сильного поглощения, за которое ответственны либо экситоны с

малым «*n*», либо коллоидный свинец и включения атомарного азота [1, 2, 5]. Учитывая возможные погрешности, связанные с люминесценцией, все измерения по исследованию центров окраски, индуцируемых в НК β -PbN₆ при электрополевом или фотохимическом разложении, а также при долговременном хранении, проводились из инфракрасной области длин волн в ультрафиолетовую.

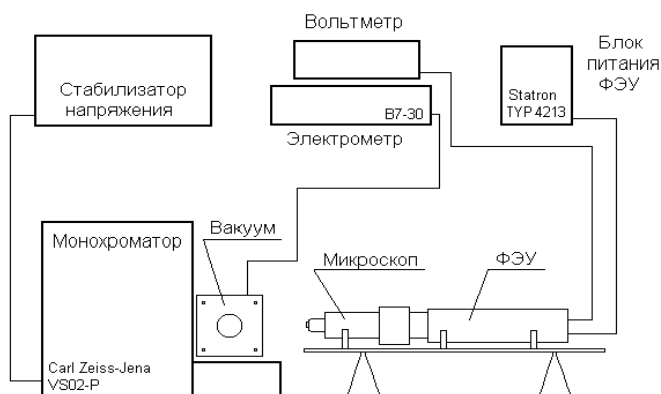


Рис.1. Блок-схема установки для исследования оптических, фотоэлектрических и электрических свойств НК

Fig.1. Block diagram of the installation for the study of optical, photovoltaic and electrical properties of FC

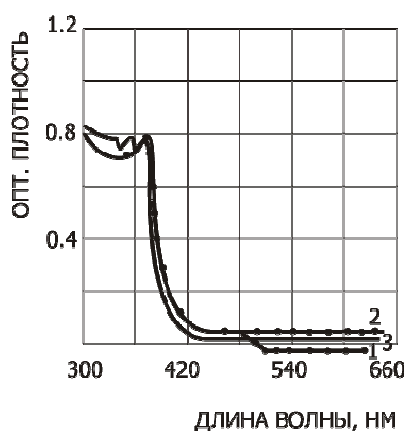


Рис.2. Спектры поглощения свежесинтезированных НК β -азид свинца: 1 – температура 293 К, спектр снимался из УФ- в ИК-область; 2 – температура 293 К, спектр снимался из ИК- в УФ-область; 3 – температура 80 К, спектр снимался из ИК- в УФ-область

Fig.2. Absorption spectra of freshly grown lead FC β -azide: 1 – temperature 293 K, the spectrum was taken from the UV to the IR area; 2 – temperature 293 K, the spectrum was taken from the IR to the UV-area; 3 – temperature 80 K, the spectrum was taken from the IR to the UV-area

Полосы поглощения в видимой части спектра с максимумами при 430, 470, 530 и 550 нм проявляются в состаренных кристаллах толщиной около 10 мкм и выше.

В кристаллах толщиной менее 3 мкм даже облучение ультрафиолетовым светом не приводит к появлению центров поглощения в видимой области, что указывает на объемный характер их распределения. В области собствен-

ного поглощения при температуре жидкого азота, как в тонких, так и в более толстых НК наблюдаются максимумы поглощения при 345÷352, 375 и 395 нм, трансформирующиеся при комнатной температуре в плато или сдвигающиеся в область более длинных волн и исчезающие совсем (рис.2 кривая 3).

Принципиальным для понимания процессов взаимодействия света с веществом НК

$\beta\text{-PbN}_6$ является выполнимость закона Бугера [5], пропорциональность оптической плотности ($\ln(I_0/I)$) толщине x . Зависимость оптической плотности от толщины, построенная для длин

волн 395, 390, 380, 370, 365 и 350 нм, является линейной, т.е. закон Бугера выполняется. Спектральное распределение коэффициентов поглощения НК $\beta\text{-PbN}_6$ приведено на рис.3.

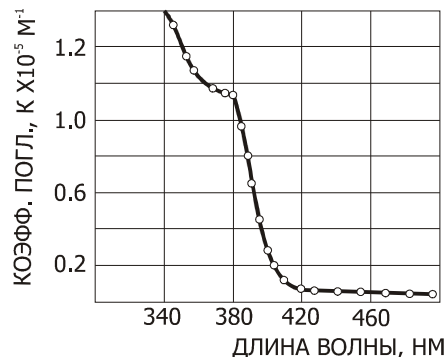


Рис.3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в НК β -азиде свинца при температуре 293 К

Fig.3. Spectral dependence of the absorption coefficient in lead FC β -azide at a temperature of 293 K

Результаты исследований
Влияние температуры на СП НК $\beta\text{-PbN}_6$

Отмечено, что с увеличением температуры от 80 К до комнатной в области длинноволнового края оптического поглощения наблюдается рост коэффициента поглощения при всех длинах волн (рис.4) с одновременным смеще-

нием границы полосы фундаментального поглощения в сторону больших длин волн. Величина смещения составляет около $0,036 \text{ нм}\cdot\text{К}^{-1}$ (рис.4), а изменение коэффициента ширины запрещенной зоны на 1 градус в максимуме поглощения равен $3,7\cdot 10^{-4} \text{ эВ}$.

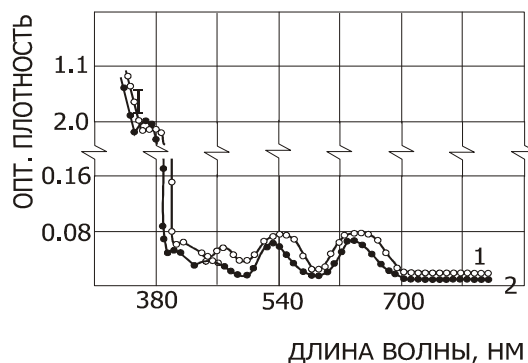


Рис.4. Спектр поглощения состаренных НК β -азиде свинца: 1 – температура 293 К; 2 – температура 90 К

Fig.4. Absorption spectrum of aged lead FC β -azide: 1 – temperature 293 K; 2 – temperature 90 K

Учитывая, что максимуму поглощения при комнатной температуре соответствует длина волны $360\pm 2 \text{ нм}$, или энергия $3,43\pm 0,02 \text{ эВ}$, а при температуре жидкого азота – длина волны $350\pm 2 \text{ нм}$, или энергия $3,53\pm 0,02 \text{ эВ}$, из соотношения (1)

$$E'_{33} = E_{33} - 3,75 \cdot 10^{-4} T, \quad (1)$$

в котором E_{33} – ширина запрещенной зоны в эВ при 0 К, а E'_{33} – ширина запрещенной зоны в эВ при температуре измерения, легко рассчитать E_{33} .

Численное значение ширины запрещенной зоны для НК $\beta\text{-PbN}_6$ при $T=0 \text{ К}$ получается равным $3,55\pm 0,02 \text{ эВ}$, что довольно хорошо согласуется с величиной $3,5 \text{ эВ}$ в α -азиде свинца [6].

Полосы поглощения, регистрируемые при комнатной температуре в состаренных НК $\beta\text{-PbN}_6$ с максимумами при 430, 470, 550 нм, сохраняются и при температуре жидкого азота, однако максимумы их смещаются на $10\div 20 \text{ нм}$ в коротковолновую область (рис.4).

Влияние деформации на СП НК β -PbN₆

До работ, выполненных в нашей лаборатории [7], отсутствовала информация о влиянии деформации на оптические свойства кристаллов АТМ, что и определило важность данного направления исследований. Деформация НК β -PbN₆ проводилась изгибом в направлении [100] и одноосным растяжением в направлении

[010] со скоростью 10^{-4} Н/с при напряжениях, соответствующих пределу прочности на разрыв. В результате деформации в спектрах поглощения НК β -PbN₆ происходят изменения (рис.5а,б), сопровождающиеся общим возрастанием оптической плотности во всем интервале длин волн и появлением элементов “тонкой структуры спектра”.

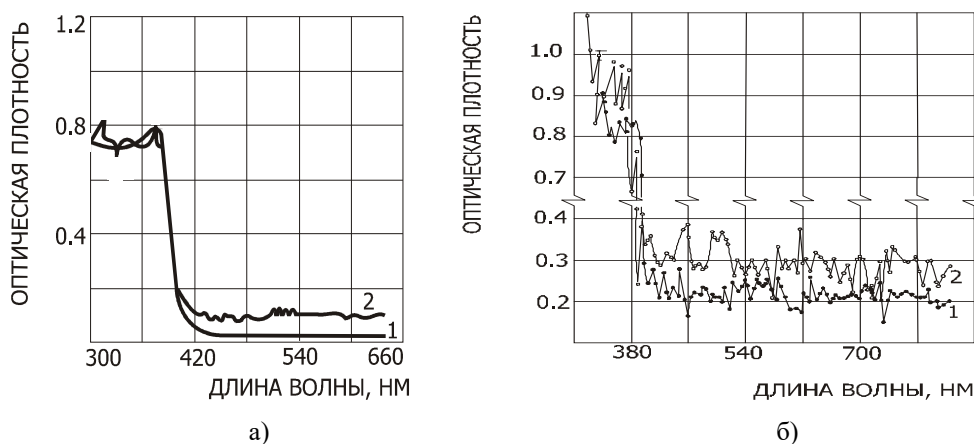


Рис.5. Спектры поглощения

Рис.5а. Спектры поглощения деформированных изгибом в направлении [100] НК β -азид свинца: 1 – температура 293 К, до деформации; 2 – температура 293 К, после деформации

Рис.5б. Спектр поглощения деформированных одноосным растяжением в направлении [010] НК β -азид свинца. Скорость нагружения 10^{-4} Н/с; температуры: 1 – 293 К; 2 – 90 К

Fig.5. Absorption spectra

Fig.5а. Absorption spectra of lead FC β -azide deformed by bending in the direction of [100]: 1 – temperature 293 K, before deformation; 2 – temperature 293 K, after deformation

Fig.5б. Absorption spectrum deformed by uniaxial stretching in the direction of [010] of lead FC β -azide. Loading speed 10^{-4} N/s; temperatures: 1 – 293 K; 2 – 90 K

Наряду с “тонкой структурой” СП наблюдается сдвиг полосы собственного поглощения в длинноволновую область, зависящий от величины нагружения. Отмечено, что максимумы “тонкой структуры” в СП НК β -PbN₆ не имеют строго фиксируемой повторяемости от кристалла к кристаллу, в отличие от “тонкой структуры”, обнаруженной в галогенидах серебра Е.А. Кирилловым с сотрудниками [8]. Время релаксации отдельных максимумов “тонкой структуры” превышает 7 суток, что не позволило соотнести центры, ответственные за нее, к термодинамическим неравновесным точечным дефектам. Предложено, что центры обусловлены как дефектами, распределенными в полях упругих напряжений, создаваемых при деформации, так и самими полями. Данную точку зрения подтверждает факт сдвига края собственного поглощения в сторону больших длин волн, сохраняющийся длительное время.

Если спектрофотометрические исследования проводились в режиме сканирования по НК β -PbN₆ до и после деформации, то в отдельных областях наблюдается уменьшение оптической плотности, в других – ее увеличение, которое не коррелирует с изменением плотности дислокаций [9], т.е. в явном виде проявляется движение (сепарация) точечных дефектов в полях упругих напряжений. Массоперенос в отсутствие движущихся дислокаций в полях механических напряжений, аналогичный наблюдаемому нами в НК азидов, методом катодолюменесценции обнаружили в большой группе неорганических кристаллов М.Ш. Акчурин с соавторами [10, 11] и Ю.И. Головин методом динамической микротвердости [12] установили с временным разрешением 1 мсек многостадийность процесса внедрения и определил активационные параметры на каждой стадии в ионных кристаллах.

Спектры поглощения нитевидных кристаллов $\beta\text{-PbN}_6$ при фото- и электрополевом воздействии. Центры окраски

Изменения наблюдаемые в СП НК $\beta\text{-PbN}_6$ после фотохимического разложения в течение 15 и 30 мин (кривые 1, 2) и последующей выдержки в электрическом поле при напряженности $E=3,3 \cdot 10^4$ В/м в течение 20 мин (кривая 3) представлены на рис.6. Фотометрировался локальный участок, прилегающий к металлическому аноду. В прианодной области как это показано в работах [13, 14] формируется сильное электрическое поле, в котором локализуются процессы разложения вследствие инжекции дырочных зарядов (радикалов N_3^0). Факт исчезновения полосы поглощения с максимумом 530÷550 нм в прианодной области при воздействии электрического поля и выделение газообразного азота [7] был объяснен тем, что за максимум 530÷550 нм ответственны дырочные центры окраски, представляющие собой инжектированные радикалы N_3^0 , локализованные на катионных вакансиях, в дальнейшем обозначаемые, как V_k^- -центры. V_k^- -центр представляет собой даже без учета поляризации отрицательно заряженный дефект в кристаллической решетке азидов свинца, способный присоединить еще одну инжектированную дырку (N_3^0). В этом случае происходит образование молекулярного азота в прианодной области и деструкция полосы поглощения с максимумами

при 530÷550 нм. Широкая полоса поглощения в длинноволновой области спектра с максимумом при 660 нм отнесена к рассеянию на частичках металлического свинца, аналогично описанному в работе [5]. Бесструктурное поглощение полосы 410÷420 нм при ФХР, как это показали В.Л. Гаррет и Д.А. Виганд [1], связано не только с формированием коллоидного свинца, но и с процессами образования и уноса молекулярного азота N_2 из кристаллической решетки азидов свинца. Точка зрения В.Л. Гаррета и Д.Л. Виганда [1] на то, что уменьшение оптической плотности при этих длинах волн связана с диффузионной миграцией к поверхности и уносом азота не противоречит и нашим экспериментам по исследованию СП при низкой и комнатной температурах. Обнаружено, что при температуре жидкого азота в СП НК $\beta\text{-PbN}_6$ при ФХР образуется полоса поглощения с максимумом при 407 нм, которая исчезает при комнатной температуре, и при этом масспектрофотометрически фиксируется выделение азота N_2 . Природа полосы поглощения при 480 нм в настоящее время четко не установлена, наиболее вероятно ее приписать либо кластерным состояниям металлического свинца, либо атомам азота, объединенным в микропоре и связанным между собой в кристаллической решетке силами поверхностного натяжения, препятствующими удалению газообразного азота из кристаллической решетки азидов. Такое удержание газа, по-видимому, и наблюдал С.М. Рябых при радиоллизе АТМ [15], когда даже при 423 К азот не покидал кристаллическую решетку.

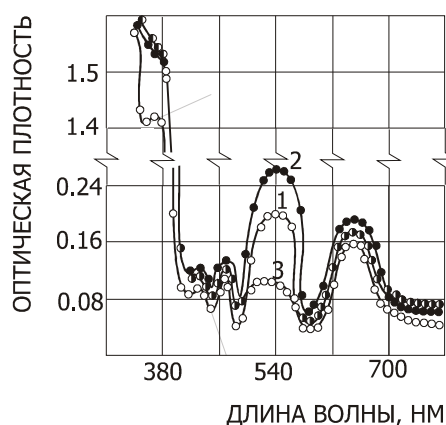


Рис.6. Спектр поглощения НК β -азидов свинца, облученных ультрафиолетовым светом длиной волны 365÷366,3 нм и интенсивностью $7,3 \cdot 10^{18}$ квант/($m^2 \cdot s$). Время облучения: 1 – 15 мин; 2 – 30 мин; 3 – после воздействия электрического поля, контакты галлиевые

Fig.6. The absorption spectrum of lead FC β -azide irradiated with ultraviolet light with a wavelength of 365÷366.3 nm and an intensity of $7.3 \cdot 10^{18}$ kvant/($m^2 \cdot s$). Irradiation time: 1 – 15 min; 2 – 30 min; 3 – after exposure to an electric field, gallium contacts

Спектры поглощения нитевидных кристаллов β -PbN₆ в поляризованном свете

Моноклинная сингония НК β -PbN₆ позволяет ожидать сильную анизотропию его физико-химических свойств [16], в том числе и оптических. Ориентация вектора напряженности падающей световой волны проводилась вдоль оси роста НК β -PbN₆ в направлении [010] ($E_{\parallel[010]}$) и перпендикулярно ей ($E_{\perp[010]}$). Оптическая плотность в области длинных волн

$\lambda > 390$ нм для света поляризованного параллельно направлению [010], примерно в два раза выше, чем в перпендикулярном направлении, что свидетельствует о соприкосновении центров азидных групп в направлении [010]. Структурных особенностей в длинноволновой области спектра для разной поляризации обнаружено не было. В области собственного поглощения наблюдается ряд пиков, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Полосы и пики, выявляемые в области фундаментального поглощения НК β -PbN₆ для света, поляризованного во взаимноперпендикулярных плоскостях $E_{\parallel[010]}$ и $E_{\perp[010]}$

Table 1. Bands and peaks detected in the region of fundamental absorption of FK β -PbN₆ for light polarized in the mutually perpendicular planes $E_{\parallel[010]}$ and $E_{\perp[010]}$

Температура	Поляризация	Полосы поглощения
293 К	$E_{\parallel[010]}$	380÷390 нм выраженное плато, слабое, пики 378, 372 и 364 нм
80 К		380÷385 нм выраженное плато, пики 378, 367, 359 и 350 нм
293 К	$E_{\perp[010]}$	380÷390 нм слабо плато, пики 378, 368, 362 и 349 нм
80 К		

Отмечено, что полоса 375 нм, ранее фиксируемая на пленках α -азид свинца в виде плато при комнатной температуре и двух пиков с длинами волн 370,0 и 379 нм при температуре жидкого азота, разрешается на два пика: положение одного из них при 378 нм не зависит ни от температуры ни от поляризации, другого – меняется в зависимости от поляризации и температуры от 367 нм до 372 нм. Подтверждается исчезновение этих полос при фотохимическом разложении. Исчезновение полосы поглощения в области 375 нм как при разложении, так и при допировании Tl^+ , позволяет сделать заключение о собственно-дефектной природе центров, ответственных за нее.

Схожую точку зрения на природу полосы с максимумом при 375 нм высказывали И. Шанда и др. [17] при обсуждении низкотемпературной (15 К) фотолуминесценции. Что касается других полос фундаментального поглощения, то они могут быть объяснены взаимодействием света с собственными точечными дефектами и их ассоциатами [18].

Выводы

1. На сконструированной микроспектрофотометрической установке, в которой реализован принцип неподвижности НК в оптическом тракте, проведены измерения на одном и том же участке НК β -PbN₆ как в режиме фотохимического разложения (ФХР), так и при действии

сильного электрического поля, измерения оптической плотности в области длин волн 300-700 нм и при температурах до 600 К.

II. Обнаружен ряд явлений и закономерностей, включающих:

1. «Отрицательное поглощение», при снятии спектра поглощения из области УФ в ИК область, при 490 нм, которое отсутствует, если спектр снимался из ИК области в УФ.

2. Проявление в состаренных кристаллах толщиной около 10 мкм и выше полосы поглощения в видимой части спектра с максимумами при 430, 470, 530 и 550 нм.

3. В кристаллах толщиной менее 3 мкм даже облучение ультрафиолетовым светом не приводит к появлению центров поглощения в видимой области, что указывает на объемный характер их распределения.

4. В области собственного поглощения при температуре жидкого азота, как в тонких, так и в более толстых НК наблюдаются максимумы поглощения при 345÷352, 375 и 395 нм, трансформирующиеся при комнатной температуре в плато или сдвигающиеся в область более длинных волн и исчезающие совсем.

5. Оценено спектральное изменение коэффициентов поглощения при комнатной температуре и температуре жидкого азота и определена ширина запрещенной зоны.

6. Влияние деформации, фото- и электрополевого воздействия на спектры поглощения.

7. Влияние поляризации световой волны, ориентация вектора напряженности падающей световой волны проводилась вдоль оси роста НК β -PbN₆ в направлении [010] ($E_{\parallel[010]}$) и перпендикулярно ей ($E_{\perp[010]}$), на структуру спектра поглощения.

Список литературы

1. Garrett W.L., Wigand D.A. Photodecomposition Kinetics of PbN₆ Studied by Optical Extinction and N₂ Gas Evolution // *J. Phys. Chem.* 1982. V. 86. P. 3884–3894.

2. Hall P. B., Williams F. Photodecomposition and Electron Structure of Lead Azide // *J. Chem. Phys.* 1973. V. 58, N 3. P. 1036–1042.

3. Иванов Ф.И., Зуев Л.Б., Лукин М.А., Мальцев В.Д. О выращивании нитевидных кристаллов азидов серебра и свинца // *Кристаллография.* 1983. Т. 28, № 1. С. 194–195.

4. Иванов Ф.И. Спектры оптического поглощения нитевидных кристаллов β -PbN₆ // В сб. статей «Прочность и пластичность перспективных материалов» под общей редакцией В. Е. Громова. Сер. "Фундаментальные проблемы современного материаловедения" Новокузнецк, 2015. С. 122–134.

5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах: Монография. М.: Недра, 1980. 456 с.

6. Захаров Ю.А., Руколеев С.И., Лоскутов В.С. Низкотемпературный фотолиз и люминесценция азидов свинца, серебра и таллия // *Хим. высоких энергий.* 1979. Т. 13, № 1. С. 61–65.

7. Иванов Ф.И. Роль структурно-деформационных дефектов в процессах, протекающих при фото- и электрополевом воздействии в азидовых тяжелых металлов // *Изв. СО АН СССР, сер. хим.* 1985. № 11, В. 4. С. 63–67.

8. Кириллов Е.А. Тонкая структура в спектре поглощения фотохимически окрашенных кристаллов галогенидов серебра и напыленных металлических слоев: Монография. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 201 с.

9. Иванов Ф.И. Влияние дислокаций на распределение продуктов фотохимического разложения нитевидных кристаллов азидов свинца // *Изв. АН СССР, серия «Неорганические материалы».* 1985. Т. 21, № 5. С. 783–786.

10. Акчурин М.Ш., Галстян В.Г. Исследование упрочнения приповерхностных слоев алюмоиттриевого граната методом микрокатодолюминесценции // *ДАН СССР.* 1980. Т. 252, № 4. С. 870–871.

11. Акчурин М.Ш., Васев Е.Н., Михина Е.Ю., Регель В.Р. О роли массопереноса материала за счет перемещения точечных эффектов

в процессе микровдавливании // *ФТТ.* 1988. Т. 30, № 3. С. 760–765.

12. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы ранних стадий внедрения жесткого индентора при микроидентировании кристаллов // *Кристаллография.* 1995. Т. 40, № 5. С. 884–888.

13. Иванов Ф.И., Зуев Л.Б., Лукин М.А., Урбан Н.А. К вопросу инициирования детонации азидов свинца в предпробивном электрическом поле // *Физ. горения и взрыва.* 1984. В. 3. С. 86–89.

14. Крашенинин В.И., Сухушин Ю.Н., Захаров Ю.А. Инжекционные токи в некоторых азидовых тяжелых металлов // *Изв. АН СССР, сер. неорг. материалы.* 1987. Т. 23, № 1. С. 1567–1569.

15. Рябых С.М. Радиационные процессы в азидовых тяжелых металлов // *Изв. АН Латв. ССР (сер. физ.).* 1984. № 3. С. 93–101.

16. Иванов Ф.И., Захаров Ю.А., Исакова Е.В. Сегнетоэлектрические свойства и механизм инициирования взрыва кристаллического азидов свинца при энергетических воздействиях // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* 2018. Т. 15, № 2. С. 294–302.

17. Schanda J., Baron B., Williams F. Short Communication Low Temperature Photoluminescence of Lead Azide // *J. of Luminiscence.* 1974. V. 9. P. 338–342.

18. Иванов Ф.И., Лукин М.А., Чмелева К.В. Спектры поглощения нитевидных кристаллов β -азидов свинца // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2002. № 6. С. 65–67.

Информация об авторах

Ф. И. Иванов – доктор химических наук, профессор Кузбасского гуманитарно-педагогического института ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

Ю. А. Захаров – доктор химических наук, профессор, чл.-корр. СО РАН, заведующий лабораторией неорганических наноматериалов института углей химии и химического материаловедения.

Е. В. Исакова – кандидат философских наук Кузбасского гуманитарно-педагогического института ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

References

1. Garrett, W.L. & Wigand, D. A. (1982). Photodecomposition Kinetics of PbN₆ Studied by Optical Extinction and N₂ Gas Evolution. *J. Phys. Chem.*, (86), 3884–3894.

2. Hall, P. & Williams, B. F. (1973). Photodecomposition and Electron Structure of Lead Azide. *J. Chem. Phys.*, 3(58), 1036–1042.
3. Ivanov, F. I., Zuev, L. B., Lukin, M. A. & Maltsev, V. D. (1983). On the cultivation of filamentous crystals of silver and lead azides. *Crystallography*, 1(28), 194–195. (In Russ.).
4. Ivanov, F. I. (2015). Optical absorption spectra of filamentous crystals β -PbN₆. Collection of articles «Strength and plasticity of promising materials» under the general editorship of V. E. Gromov. Ser. «Fundamental problems of modern materials science» Novokuznetsk. P. 122–134. (In Russ.).
5. Cook, M. A. (1980). Science of industrial explosives. Monograph. M.: Nedra. P. 456. (In Russ.).
6. Zakharov, Yu. A., Rukoleev, S. I. & Loskutov, V. S. (1979). Low-temperature photolysis and luminescence of lead, silver and thallium azides. *Chem. high energies*, 1(13), 61–65. (In Russ.).
7. Ivanov, F. I. (1985). The Role of structural deformation defects in the processes occurring in the photo and elektropodemom aidah exposure to heavy metals. *Izv. SO AN SSSR, ser. chem.*, 11(4), 63–67. (In Russ.).
8. Kirillov, E. A. (1954). Fine structure in the spectrum of the absorption photochemically colored crystals of silver halides and deposited metal layers. Monograph. M.: Izd-vo AN SSSR. P. 201. (In Russ.).
9. Ivanov, F. I. (1985). Influence of dislocations on the distribution of the products of the photochemical decomposition of whiskers lead azide. *Izv. USSR Academy of Sciences, a series of «Inorganic materials»*, 5(21), 783–786. (In Russ.).
10. Akchurin, M. S. & Galstyan, V. G. (1980). Study of hardening of near-surface layers of aluminum-yttrium garnet by microcathodoluminescence method. *DAN USSR*, 4(252), 870–871. (In Russ.).
11. Akchurin, M. S., Vasev, E. N., Mikhin, E. Yu. & Regel, V. R. (1988). On the role of mass transport of material due to the moving point effects in the process of microdelivery. *FTT*, 3(30), 760–765. (In Russ.).
12. Golovin, Y. I. & Tyurin, A. I. (1995). Dynamics and the micro mechanics of the early stages of the introduction of a rigid indenter when micro-disturbance crystals. *Crystallography*, 5(40), 884–888. (In Russ.).
13. Ivanov, F. I., Zuev, L. B., Lukin, M. A. & Urban, N. A. (1984). On the issue of initiation of detonation of lead azide in a pre-test electric field. *Phys. gorenje and explosion*, (3), 86–89. (In Russ.).
14. Krashenin, V. I., Sukhushin, Yu. N. & Zakharov, Yu. A. (1987). Injection currents in some heavy metal azides. *Izv. AN USSR, ser. neorg. materials*, 1(23), 1567–1569. (In Russ.).
15. Ryabykh, S. M. (1984). Radiation processes in heavy metal azides. *Izv. AN Latv. SSR (ser. Phys.)*, 3, 93–101. (In Russ.).
16. Ivanov, F. I., Zakharov, Yu. A. & Isakova, E. V. (2018). Ferroelectric properties and the mechanism of explosion initiation of crystalline lead azide under energy impacts. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(15), 294–302. (In Russ.).
17. Schanda, J., Baron, B. & Williams, B. F. (1974). Short Communication Low Temperature Photoluminescence of Lead Azide. *J. of Luminescence*, (9), 338–342.
18. Ivanov, F. I., Lukin, M. A. & Shmeleva, K. V. (2002). Absorption Spectra of the whiskers of β -lead azide. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 6, 65–67. (In Russ.).

Information about the authors

F. I. Ivanov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University.

Yu. A. Zakharov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the SB RAS, Head of Laboratory of Inorganic Nanomaterials, Institute of Coal Chemistry and Materials Chemistry.

E. V. Isakova – Candidate of Philosophical Sciences, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.01.2022; одобрена после рецензирования 07.02.2022; принята к публикации 14.02.2022.

The article was received by the editorial board on 27 Jan. 22; approved after reviewing 07 Feb. 22; accepted for publication 14 Feb. 22.