

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ZnO/C,
СФОРМИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ****Н. М. Денисов^{*}, Е. Б. Чубенко, Т. А. Шевцова,
В. П. Бондаренко, В. Е. Борисенко**

УДК 535.37;620.3

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, Беларусь; e-mail: waefae@gmail.com**(Поступила 9 августа 2017)*

Пленки нелегированного оксида цинка (ZnO) и нанокompозита ZnO/C сформированы золь-гель методом на стеклянных подложках и стеклоткани с использованием в качестве прекурсора ацетата цинка и добавлением в него хлорида цинка соответственно. Анализ спектров фотолюминесценции пленок ZnO/C при высоком (N₂-лазер) и низком (HeCd-лазер) уровнях возбуждения позволил установить определяющую роль связанных экситонов в этом процессе при температурах 20–60 К, что обусловлено присутствием остатков хлора в пленках. С повышением температуры до 300 К в фотолюминесценции пленок ZnO/C начинает преобладать роль рекомбинации через ILO- и 2LO-фононные реплики уровня свободных экситонов и примесно-дефектные уровни.

Ключевые слова: оксид цинка, углерод, нанокompозит, золь-гель метод, фотолюминесценция.

Films of undoped ZnO and of ZnO/C nanocomposite were formed by the sol-gel method on glass substrates and on fiberglass using zinc acetate as a precursor and adding zinc chloride into it, respectively. Analysis of the photoluminescence spectra of ZnO/C films at high (N₂-laser) and low (HeCd-laser) excitation levels made it possible to establish the defining role of bound excitons in the photoluminescence at 20–60 K, due to the presence of chlorine residues in the films. With the temperature increase to 300 K the role of recombination through ILO- and 2LO-phonon replicas of free exciton levels and impurity levels begins to dominate in photoluminescence of ZnO/C films.

Keywords: zinc oxide, carbon, nanocomposite, sol-gel method, photoluminescence.

Введение. Оксид цинка (ZnO) является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3.37 эВ [1] при комнатной температуре. Высокая энергия связи экситонов (60 мэВ) [2] позволяет этому материалу демонстрировать интенсивную экситонную фотолюминесценцию (ФЛ) в УФ области спектра при комнатной температуре, что может быть использовано для создания светодиодов фиолетового и УФ диапазонов. Благодаря высокой фотокаталитической активности и низкой стоимости ZnO применяется для фотокаталитической очистки воды и воздуха. Для этих целей наиболее востребованы наноструктурированные пленки [3–5], обладающие большой площадью поверхности, доступной для протекания фотокаталитических реакций.

Один из способов повышения фотокаталитической активности материалов на основе ZnO — формирование углеродсодержащих композитов, так как углерод способен захватывать электроны, образующиеся в ZnO при его УФ облучении, предотвращая таким образом электронно-дырочную рекомбинацию, что отражается в тушении ФЛ и повышении его фотокаталитической активности [6]. Кроме того, сообщалось о повышенной эффективности адсорбции загрязнителей на поверхности нанокompозитов ZnO/C благодаря включениям углерода [7] и о повышенной фотокоррозионной стойкости данных нанокompозитов по сравнению с нелегированным ZnO [8].

PHOTOLUMINESCENCE OF ZnO/C NANOCOMPOSITES FORMED BY THE SOL-GEL METHOD**N. M. Denisov^{*}, E. B. Chubenko, T. A. Shevtsova, V. P. Bondarenko, V. E. Borisenko** (*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Browka Str., Minsk, 220013, Belarus; e-mail: waefae@gmail.com*)

Несмотря на многочисленные исследования фотокаталитической активности композитов ZnO/C, их ФЛ-свойства при низких температурах до сих пор мало изучены. Как известно, низкотемпературная ФЛ ZnO позволяет получить информацию об экситонных уровнях в запрещенной зоне, с которых происходит рекомбинация носителей заряда, а по соотношению интенсивностей в максимумах экситонной ФЛ можно судить о совершенстве кристаллической структуры материала [9], что важно для управления фотокаталитическими свойствами композитов ZnO/C.

Цель данной работы — исследование ФЛ-свойств нанокompозитных пленок ZnO/C, сформированных золь-гель методом на подложках из стекла и стеклоткани, и их интерпретация на основе экспериментальных данных для идентично сформированных нелегированных пленок ZnO.

Эксперимент. В качестве подложек использованы предметные стекла толщиной 1 мм и стеклоткань ЭЗ-200 толщиной 0.191 мм, предварительно промытые в ацетоне и дистиллированной воде. Золь для формирования пленок ZnO готовили по ранее отработанной методике [10, 11] путем смешивания изопропилового спирта (C₃H₇OH), моноэтаноламина (NH₂-CH₂CH₂-OH) и безводного ацетата цинка ((CH₃COO)₂Zn) в молярном соотношении 49:7:5. Для формирования пленок ZnO/C в приготовленном золе объемом 17.6 мл дополнительно растворяли 0.6 г ZnCl₂, что соответствует 3.45 мас.%. Полученные золи выдерживали в течение 1 сут при комнатной температуре для полного растворения ацетата цинка, после чего послойно наносили на стекла и стеклоткань методом окунания: подложки погружали в соответствующий золь на 1 мин, медленно извлекали и высушивали при 200 °С в течение 5 мин на воздухе. После последовательного нанесения таким способом четырех слоев образцы подвергали термообработке на воздухе при 500 °С в течение 30 мин. Толщина сформированных пленок на стекле 1—8 мкм.

ФЛ-свойства пленок исследованы при возбуждении импульсным излучением N₂-лазера ($\lambda = 337$ нм, поверхностная плотность мощности 500 кВт/см², длительность импульсов 10 нс) при комнатной температуре и непрерывным излучением HeCd-лазера ($\lambda = 325$ нм, поверхностная плотность мощности 10 Вт/см²) в температурном диапазоне 20—300 К. Спектральная интенсивность излучения образцов зарегистрирована в диапазоне длин волн 350—725 нм спектрометром Solar LS SDH-VI со спектральной шириной полосы регистрации 350—800 нм. Полученные спектры ФЛ исправлены с учетом спектральной чувствительности системы регистрации, калибровка которой проведена относительно спектра излучения вольфрамовой лампы.

Результаты и их обсуждение. При использовании золя без добавления ZnCl₂ как на стеклянных подложках, так и на стеклоткани формируются белые матовые пленки ZnO. На поверхности стекла при использовании золь с добавлением ZnCl₂ формируются черные пленки ZnO/C, а на стеклоткани — преимущественно белые с черными краями. Морфология и структура пленок ZnO и ZnO/C, сформированных по аналогичной технологии на стекле, ранее исследованы нами [10] и установлено, что белые матовые пленки состоят из кристаллических частиц ZnO размером 50—150 нм. Черные пленки, сформированные на стекле, представляют собой нанокompозиты ZnO/C из кристаллитов ZnO с включениями аморфного углерода. В них зарегистрирована и примесь хлора. Добавленный в золь ZnCl₂ расплавляется при термообработке при 500 °С и блокирует доступ кислорода в пленки ZnO, препятствуя сгоранию остатков органических компонентов золя. Кроме того, ZnCl₂ является льюисовой кислотой [12] и способен катализировать многие реакции разложения органических соединений, приводящие к образованию свободного углерода.

Спектры ФЛ пленок ZnO и ZnO/C на стекле и стеклоткани, полученные при комнатной температуре, приведены на рис. 1. Многие исследователи сообщают о подавлении электронно-дырочной рекомбинации в композитах ZnO/C вследствие разделения носителей заряда на гетеропереходе ZnO/C, что приводит к тушению ФЛ [6, 13—20]. Однако в сформированных нами пленках ZnO/C существенного снижения интенсивности ФЛ не наблюдается. Напротив, пленки ZnO/C на стеклоткани имеют заметно более высокую интенсивность ФЛ как в УФ, так и в видимом диапазоне излучения. По-видимому, при формировании пленок ZnO/C по разработанной нами технологии углерод образуется преимущественно в нижних слоях пленок, вклад которых в общую интенсивность ФЛ относительно мал. Кроме того, в процессе сушки золь, содержащих ZnCl₂, значительная часть хлорида кристаллизуется на поверхности пленок и в процессе отжига может разлагаться с образованием ZnO со структурой, отличной от полученной из чистого ацетата цинка.

При комнатной температуре и возбуждении ФЛ излучением N₂-лазера (337 нм, 500 кВт/см²) спектры ФЛ всех образцов содержат один узкий несимметричный максимум в УФ области, уширяющийся в длинноволновую сторону (рис. 1, а) и расположенный при $\lambda = 391$ нм (ZnO на стекле),

385 (ZnO/C на стекле), 399 (ZnO на стеклоткани) и 391 нм (ZnO/C на стеклоткани). Вследствие высокой плотности мощности излучения N₂-лазера для всех образцов наблюдается стимулированная ФЛ, соответствующая высокому уровню возбуждения. Длительность импульсов излучения (10 нс) при этом значения не имеет, поскольку она значительно превышает длительность затухания излучения в оксиде цинка. Преобладающим механизмом ФЛ при высоком уровне возбуждения являются экситон-экситонное взаимодействие и рекомбинация электронно-дырочной плазмы, что отмечено и в работе [21] по ФЛ наночастиц ZnO размером 55 нм при мощности излучения >51 МВт/см². Увеличение плотности электронно-дырочных пар в ZnO с повышением уровня возбуждения приводит к сужению запрещенной зоны, вследствие чего наблюдается красное смещение максимумов ФЛ относительно их положения при низком уровне возбуждения [22], показанном на рис. 1, б. Примечательно, что для пленок ZnO/C максимум экситонной ФЛ расположен в более коротковолновой области по сравнению с пленками ZnO. Учитывая, что подобный сдвиг ФЛ наблюдался в [23—25] при повышении содержания хлора в структурах ZnO, в нашем случае данное явление также можно связать с примесью хлора в пленках ZnO/C, сформированных из золя с добавлением ZnCl₂. Согласно [24, 25], данный сдвиг обусловлен проявлением эффекта Бурштейна—Мосса при легировании ZnO хлором.

В свою очередь при низком уровне возбуждения излучением HeCd-лазера (325 нм, 10 Вт/см²) наблюдается спонтанная ФЛ с участием экситонных, дефектных и примесных уровней в ZnO (рис. 1, б). В данном случае спектры ФЛ всех образцов имеют два ярко выраженных максимума: в УФ (350—400 нм) и видимом (400—700 нм) диапазонах излучения.

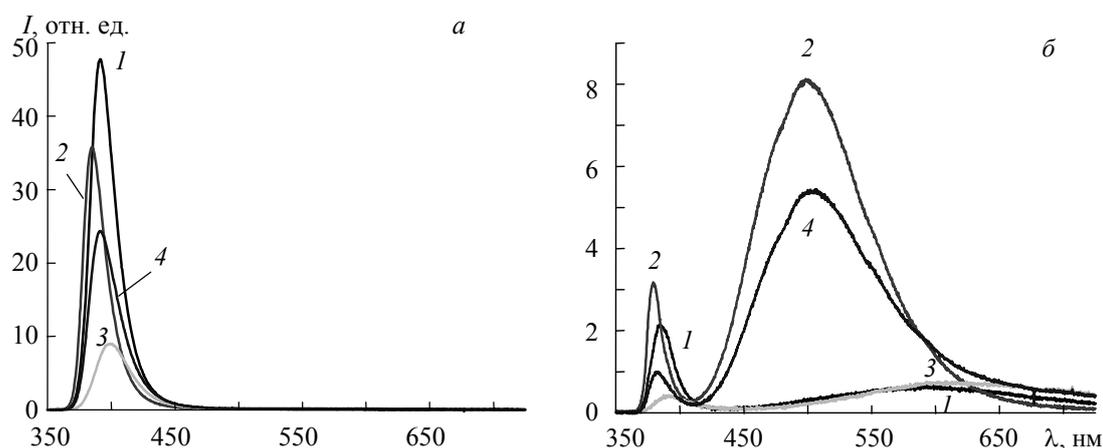


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции пленок ZnO (1, 3) и ZnO/C (2, 4) на стекле (1, 2) и на стеклоткани (3, 4), полученные при возбуждении лазерным излучением с $\lambda = 337$ (а) и 325 нм (б) при комнатной температуре

Максимумы в УФ области спектра имеют характерное уширение в длинноволновой части и расположены при $\lambda = 384$ нм (ZnO на стекле), 379 (ZnO/C на стекле), 391 (ZnO на стеклоткани), 382 нм (ZnO/C на стеклоткани). УФ ФЛ ZnO при комнатной температуре связывают с излучательной рекомбинацией с фоновых реплик уровня свободных экситонов [26]. Согласно [27, 28], максимум экситонной ФЛ ZnO при комнатной температуре соответствует рекомбинации с 1LO- или 2LO-фононной реплики уровня свободных экситонов, а его уширение в длинноволновой области относится к фоновым репликам более высокого порядка.

Различие в положениях максимума УФ ФЛ для пленок ZnO на стекле (384 нм) и на стеклоткани (391 нм) может быть связано с присутствием в излучении последних высокотемпературной H -полосы, соответствующей экситон-электронному взаимодействию. Данная полоса ранее была зафиксирована в [29] для низкоомных образцов ZnO по превышению теоретически предсказанного температурного коэффициента смещения полосы ФЛ, соответствующей 2LO-фононной реплике уровня свободных экситонов (A -2LO).

ФЛ пленок ZnO и ZnO/C в видимой области, наблюдаемая при возбуждении излучением HeCd-лазера, свидетельствует о наличии в них дефектов и примесей. Судя по соотношению интенсивностей ФЛ в УФ и видимой областях, пленки ZnO отличаются более высоким структурным со-

вершенством по сравнению с пленками ZnO/C, что, согласно [24], также может быть связано с присоединением хлора в последних. В видимой области спектра для пленок ZnO на стекле и стеклоткани наблюдается широкий максимум при $\lambda = 595$ нм. Данная желто-оранжевая ФЛ может быть связана с присутствием в них следов щелочных металлов (Li) [30] или междоузельного кислорода [31—33].

Пленки ZnO/C как на стекле, так и на стеклоткани демонстрируют интенсивную ФЛ при $\lambda = 500$ нм. Данную полосу ФЛ в основном связывают с кислородными вакансиями в решетке ZnO [31, 34—36]. Хотя повышенное содержание кислородных вакансий в нановолокнах ZnO/C ранее отмечалось в [20], в нашем случае оно может быть связано с высоким содержанием ZnCl_2 в высушенных пленках. С одной стороны, его расплавление в процессе отжига при 500°C может ограничивать доступ кислорода в пленки, создавая условия как для пиролиза органических соединений с образованием углерода, так и для образования кислородных вакансий в кристаллической решетке ZnO. С другой стороны, как отмечают авторы [25], в случае легирования ZnO хлором концентрация кислородных вакансий в ZnO также может повышаться вследствие большого ионного радиуса ионов хлора, обуславливающего искажение зонной структуры ZnO. Данное влияние ионов хлора в решетке ZnO на образование кислородных вакансий наблюдалось в [25, 37] по усилению зеленой полосы ФЛ для наноструктур и наночастиц ZnO с повышением уровня их легирования хлором. Отметим, что некоторые авторы связывают зеленую полосу ФЛ с присутствием ионов меди, замещающих цинк в решетке ZnO [26, 30].

Спектры ФЛ пленок ZnO и ZnO/C на стекле, полученные в диапазоне температур $20\text{--}300$ К, представлены на рис. 2. Поскольку использован спектрометр с относительно большой спектральной шириной полосы регистрации (450 нм), наблюдаемые узкие максимумы ФЛ имеют невысокое разрешение. Положение максимумов экситонной ФЛ пленок ZnO при 20 К $\lambda = 368, 369, 374, 384\text{--}385$ нм (наиболее интенсивный максимум), $389\text{--}392$ и $401\text{--}406$ нм. Аналогично для пленки ZnO/C на стекле при 20 К наблюдаются максимумы при $\lambda = 368, 369$ (наиболее интенсивный), $372, 374$ и 383 нм.

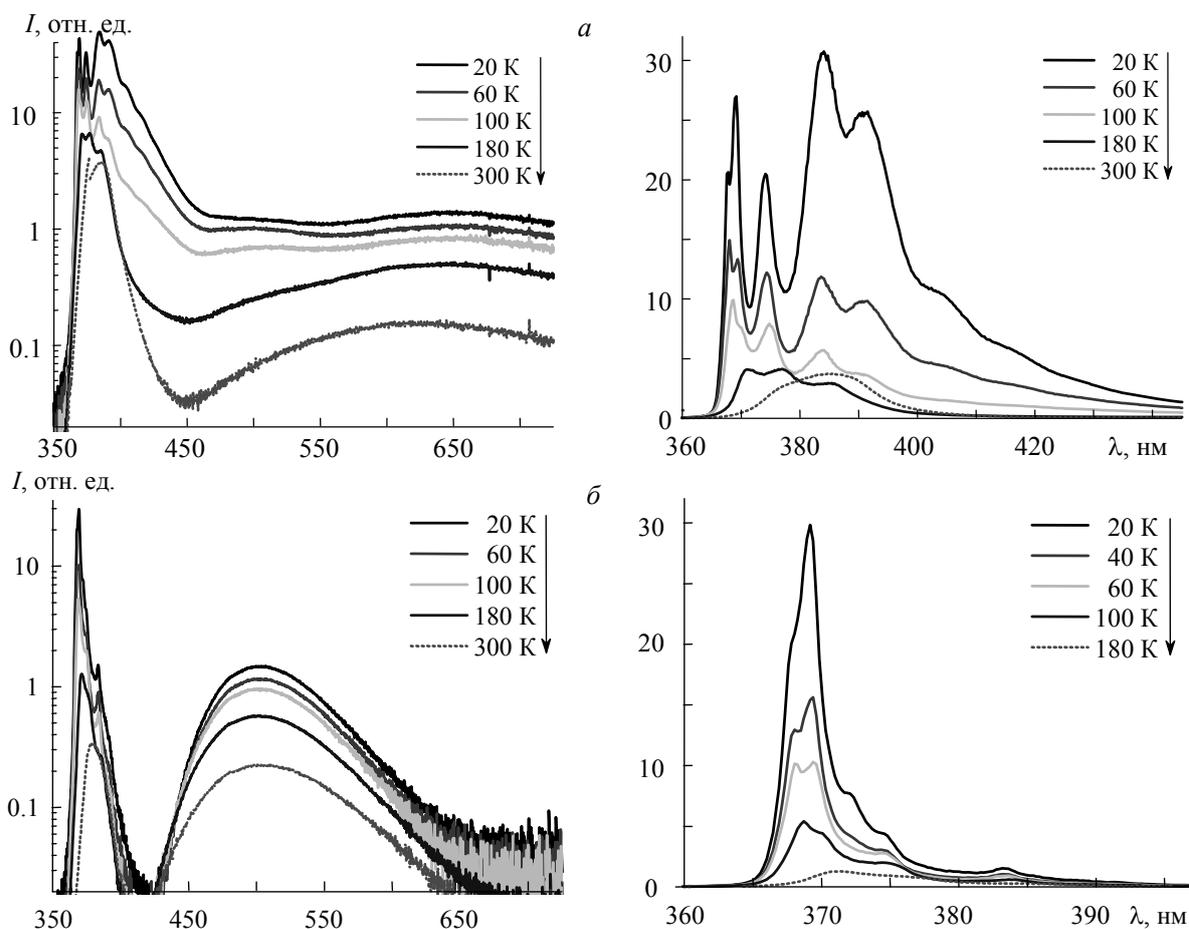


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции пленок ZnO (а) и ZnO/C (б) на стекле, полученные в интервале температур $20\text{--}300$ К при возбуждении излучением HeCd-лазера (325 нм, 10 Вт/см²)

На основании максимумов ФЛ в УФ области при 20 К по [28] идентифицированы уровни в запрещенной зоне ZnO, с которых происходит излучательная рекомбинация. Максимумы для 1LO- и 3LO-фононных реплик уровня связанных экситонов могут также присутствовать в спектрах, но они практически не различимы на фоне максимумов для свободных экситонов.

Отдельные максимумы экситонной ФЛ становятся различимыми при температурах <180 К для пленки ZnO и <100 К для пленки ZnO/C, при этом соотношение интенсивностей в максимумах изменяется с температурой. Максимумы для связанных экситонов проявляются при температурах <80 К аналогично [28]. С повышением температуры излучение свободных экситонов в ZnO ослабевает вследствие высокой эффективности образования пар LO-фонон–экситон [28], а общая интенсивность ФЛ пленок ZnO и ZnO/C снижается вследствие температурного тушения ФЛ [26, 27]. Экспериментально наблюдаемые характерные максимумы в спектрах низкотемпературной ФЛ пленок ZnO и ZnO/C на стекле обобщены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Положения (λ , нм) максимумов фотолюминесценции пленок ZnO и ZnO/C на стекле при 20 К и соответствующие им экситонные уровни в запрещенной зоне ZnO

λ , нм	Уровень	I , отн. ед.	
		пленка ZnO	пленка ZnO/C
368	свободный экситон	20.59	20.7
369	связанный экситон	26.84	29.82
374	свободный экситон + 1LO-фонон	20.55	4.61
383—384	свободный экситон + 2LO-фонон	30.65	1.58
385	связанный экситон + 2LO-фонон	29.8	—
392	свободный экситон + 3LO-фонон	25.7	—
401	свободный экситон + 4LO-фонон	11.21	—
403	связанный экситон + 4LO-фонон	10.65	—

ФЛ с 2LO-фононной реплики уровня свободных экситонов доминирует при 20 К для пленок ZnO, что указывает на очень высокое совершенство их кристаллической структуры. Согласно [9], в совершенных по кристаллической структуре образцах ZnO интенсивность 2LO-линий ФЛ сравнима с интенсивностью 1LO-линий, что связано с большим количеством возможных комбинаций фононов в двухфононном процессе.

При температурах <40 К пленка ZnO/C также излучает на $\lambda = 372$ нм. Авторы [38] связывают ФЛ на данной длине волны с экситонными комплексами с глубокими центрами и двухэлектронными переходами, что, вероятно, имеет место и в нашем случае.

Поскольку максимум ФЛ при $\lambda = 368$ нм, связанный с излучательной рекомбинацией свободных экситонов, соответствует энергии 3.34 эВ, с учетом энергии связи экситонов в ZnO $E_{св} = 0.06$ эВ [31] ширину запрещенной зоны ZnO в сформированных пленках можно оценить 3.4 эВ при 20 К, что близко к ранее полученному значению 3.44 эВ [39] для ZnO с кристаллической решеткой вюрцита при 6 К.

Закключение. Золь-гель технология позволяет формировать наноструктурированные пленки ZnO с высоким совершенством кристаллической структуры, что подтверждается их интенсивной фотолюминесценцией с 2LO-фононной реплики уровня свободных экситонов при 20 К. Добавление ZnCl₂ в исходные золи на основе ацетата цинка приводит к формированию полностью или частично черных пленок ZnO/C, для которых характерны синий сдвиг максимума экситонной фотолюминесценции при комнатной температуре; интенсивная фотолюминесценция при 20 К экситонов, связанных на хлоре; усиление фотолюминесценции на длине волны 500 нм, связанной с кислородными вакансиями и/или примесью меди, а также ухудшение совершенства кристаллической структуры ZnO. Фотолюминесцентные свойства при комнатной температуре, проявляемые пленками ZnO и ZnO/C на стекле, воспроизводятся и при использовании стеклоткани в качестве подложек.

Авторы благодарят Г. П. Яблонского, М. С. Леоненю и В. А. Никитенко за фотолюминесцентные исследования образцов и ценные комментарии к полученным спектрам.

Работа выполнена в рамках задания 3.2.04 ГПНИ Республики Беларусь “Конвергенция”, задания 2.1.02 ГПНИ Республики Беларусь “Фотоника, опто- и микроэлектроника” и при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант № 17-3021).

- [1] A. Janotti, C. G. V. de Walle. Rep. Prog. Phys., **72**, N 12 (2009) 126501-1—126501-29
- [2] A. B. Djuricic, Y. H. Leung. Small, **2**, N 8-9 (2006) 944—961
- [3] Н. М. Денисов, Ф. А. д'Авитая, В. Е. Борисенко. Неорг. матер., **50**, № 6 (2014) 620—624
[N. M. Denisov, F. A. d'Avitaya, V. E. Borisenko. Inorg. Mater., **50**, N 6 (2014) 572—575]
- [4] Н. М. Денисов, А. В. Баглов, В. Е. Борисенко, Е. В. Дроздова. Неорг. матер., **52**, № 5 (2016) 570—575
[N. M. Denisov, A. V. Baglov, V. E. Borisenko, E. V. Drozdova. Inorg. Mater., **52**, N 5 (2016) 523—528]
- [5] Н. М. Денисов, А. В. Баглов, В. Е. Борисенко. Неорг. матер., **53**, № 2 (2017) 161—165
[N. M. Denisov, A. V. Baglov, V. E. Borisenko. Inorg. Mater., **53**, N 2 (2017) 176—180]
- [6] J. Mu, C. Shao, Z. Guo, Z. Zhang, M. Zhang, P. Zhang, B. Chen, Y. Liu. ACS Appl. Mater., **3** (2011) 590—596
- [7] C. Han, M.-Q. Yang, B. Weng, Y.-J. Xu. Phys. Chem. Chem. Phys., **16**, N 32 (2014) 16891—16903
- [8] L. Zhang, H. Cheng, R. Zong, Y. Zhu. J. Phys. Chem. C, **113**, N 6 (2009) 2368—2374
- [9] Е. Н. Будилова, В. А. Никитенко, С. М. Кокин. Изв. РАН. Сер. физ., **79**, № 2 (2015) 181—185
- [10] N. M. Denisov, E. V. Chubenko, V. P. Bondarenko, V. E. Borisenko. J. Sol-Gel Sci. Technol., **85** (2018) 413—420
- [11] T. A. Filippova, V. E. Borisenko. Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Reviews and short notes to Nanomeeting-2017, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2017) 365—368
- [12] A. Corma, H. Garcia. Chem. Rev., **103**, N 11 (2003) 4307—4365
- [13] Y. Yan, T. Chang, P. Wei, S.-Z. Kang, J. Mu. J. Disper. Sci. Technol., **30**, N 2 (2009) 198—203
- [14] M. J. Sampaio, R. R. Bacsá, A. Benyounes, R. Axet, P. Serp, C. G. Silva, A. M. T. Silva, J. L. Faria. J. Catal., **331** (2015) 172—180
- [15] L. Fu, G. Lai, H. Zhang, A. Yu. J. Nanosci. Nanotechnol., **15**, N 6 (2015) 4325—4331
- [16] X. Liu, L. Pan, Q. Zhao, T. Lv, G. Zhu, T. Chen, T. Lu, Z. Sun, C. Sun. Chem. Eng. J., **183** (2012) 238—243
- [17] Y. Zhang, S. Zhang, M. Zheng, H. Pang. Int. J. Electrochem. Sci., **10** (2015) 8706—8713
- [18] Y. Li, B.-P. Zhang, J.-X. Zhao, Z.-H. Ge, X.-K. Zhao, L. Zou. Appl. Surf. Sci., **279** (2013) 367—373
- [19] H.-F. Yu, H.-Y. Chou. Powder Technol., **233** (2013) 201—207
- [20] M. Samadi, H. A. Shivaee, A. Pourjavadi, A. Z. Moshfegh. Appl. Catal., A, **466** (2013) 153—160
- [21] K. Suzuki, M. Inoguchi, K. Fujita, S. Murai, K. Tanaka, N. Tanaka, A. Ando, H. Takagi. J. Appl. Phys., **107**, N 12 (2010) 124311-1—124311-6
- [22] C. Klingshirn. Phys. Status Solidi (b), **244**, N 9 (2007) 3027—3073
- [23] J. B. Cui, Y. C. Soo, T. P. Chen, U. J. Gibson. J. Phys. Chem. C, **112**, N 12 (2008) 4475—4479
- [24] R. Yousefi, A. K. Zak, M. R. Mahmoudian. J. Solid State Chem., **184**, N 10 (2011) 2678—2682
- [25] R. Yousefi, F. Jamali-Sheini. Ceram. Int., **38**, N 7 (2012) 5821—5825
- [26] P. A. Rodnyi, I. V. Khodyuk. Opt. Spectrosc., **111**, N 5 (2011) 776—785
- [27] T. Hirai, Y. Harada, S. Hashimoto, T. Itoh, N. Ohno. J. Lumin., **112**, N 1-4 (2005) 196—199
- [28] W. Shan, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, K. M. Yu, H. B. Yuan, H. P. Xin, G. Cantwell, J. J. Song. Appl. Phys. Lett., **86** (2005) 191911-1—191911-3
- [29] В. А. Никитенко, С. М. Кокин, С. Г. Стоюхин, С. В. Мухин. Сб. ст. 10-го Бел.-Рос. семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”, Минск, Ин-т физики НАНБ (2015) 118—121
- [30] В. А. Никитенко. Журн. прикл. спектр., **57**, № 5-6 (1992) 367—385 [V. A. Nikitenko. J. Appl. Spectr., **57** (1992) 783—798]
- [31] S. Vempati, J. Mitra, P. Dawson. Nanoscale Res. Lett., **7**:470 (2012) 1—10
- [32] N. Tu, N. T. Tuan, N. V. Dung, N. D. Cuong, N. D. T. Kien, P. T. Huy, N. V. Hieu, D. H. Nguyen. J. Lumin., **156** (2014) 199—204
- [33] A. Escobedo Morales, R. Aceves, U. Pal, J. Z. Zhang. J. Nanosci. Nanotechnol., **8**, N 11 (2008) 1—7
- [34] S. Mehmood, M. A. Rehman, H. Ismail, B. Mirza, A. S. Bhatti. Int. J. Nanomed., **10**, N 1 (2015) 4521—4533
- [35] Q. Zhu, C. Xie, H. Li, C. Yang, S. Zhang, D. Zeng. J. Mater. Chem. C, **2**, N 23 (2014) 4566—4580
- [36] M. Willander, N. Bano, O. Nur. ECS Transactions, **19**, N 12 (2009) 1—12
- [37] Z. Tao, X. Yu, X. Fei, J. Liu, G. Yang, Y. Zhao, S. Yang, L. Yang. Opt. Mater., **31**, N 1 (2008) 1—5
- [38] S. S. Hussain, H. Noor, S. Riaz, A. Hashmi, S. Naseem. Proc. 2016 World Congress on Advances in Civil, Environm. Mater. Res. (ACEM'16), 28 August–1 September 2016, Jeju Island, Korea (2016); http://www.i-asem.org/publication_conf/acem16/6.ICAM16/W2H.1.MR372_1593F1.pdf
- [39] A. Mang, K. Reimann, S. Rubenacke. Solid State Commun., **94**, N 4 (1995) 251—254