

PACS: 73.90.+f

SPECTRA OF ZnO SUPERDISPERSED PARTICLES POLARIZED IN AN MAGNETIC FIELD

V.I. Tyutyunnikov

*Pryazovskyi State Technical University
Mariupol, St. Universitetskaya, 7, 87500, Ukraine
e-mail: vladimir-tjutunnikov@rambler.ru*

Received February 3, 2016

This paper discusses the spectra of photo - and ion-luminescence (PL and IL) of ultrafine crystals (UDC) ZnO deposited on the substrate in an magnetic field. UDC ZnO was obtained by separation in a water emulsion industrial phosphor (K-56). The fluorescence spectra for initial sample have a relatively intense broad band in the visible region, which during the deposition of the initial sample in magnetic field becomes less intense. PL spectra for ZnO UDC have weak intensity bands in the visible region. And UDC PL spectra for ZnO deposited in an magnetic field, and do not have this band. While this exciton band with $\lambda_{\max}=401\text{nm}$ for all the samples remains almost unchanged. When exposed to samples of oxygen ions spectra were obtained ionoluminescence, which differ from the fluorescence spectra. The analysis of the spectral characteristics obtained under the influence of ions sour-kind of the ZnO crystals shows that the intensity of the broad band in the visible region responsible for the defects formed by oxygen ions.

KEYWORDS: spectrum, photoluminescence, ionoluminescence, magnetic field, ZnO, ultrafine crystals

СПЕКТРЫ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ZnO, ПОЛЯРИЗОВАННЫХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.И. Тютюнников

*Приазовский государственный технический университет
г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, 87500, Украина*

В данной работе рассматриваются спектры фото- и ионо-люминесценции (ФЛ и ИЛ) ультрадисперсных кристаллов (УДК) ZnO, осаждённых на подложку в магнитном поле. УДК ZnO получали путём разделения на фракции в водной эмульсии промышленного люминофора (К-56). Спектры ФЛ для исходного образца имеют довольно интенсивную широкую полосу в видимой области, которая при осаждении исходного образца в магнитном поле, становится менее интенсивной. Спектры ФЛ для УДК ZnO имеют слабую интенсивность полосы в видимой области. А спектры ФЛ для УДК ZnO, осаждённых в магнитном поле, практически не имеют этой полосы. При этом экситонная полоса с $\lambda_{\max}=402\text{nm}$ для всех образцов остаётся практически неизменной. При воздействии на образцы ионами кислорода были получены спектры ионолюминесценции, которые отличаются от спектров ФЛ. Анализ спектральных характеристик, полученных при воздействии ионами кислорода на кристаллы ZnO показывает, что за интенсивность широкой полосы в видимой области ответственны дефекты, образованные ионами кислорода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спектр, фотолуминесценция, ионолюминесценция, магнитное поле, ZnO, ультрадисперсные кристаллы

СПЕКТРИ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК ZnO, ПОЛЯРИЗОВАНИХ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ

В.І. Тютюнников

*Приазовський державний технічний університет
м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, 87500, Україна*

В даній роботі розглядаються спектри фото - та іонолюмінесценції (ФЛ та ІЛ) ультрадисперсних кристалів (УДК) ZnO, осаджених на основу в магнітному полі. УДК ZnO отримували шляхом поділу на фракції в водній емульсії промислового люмінофора (К-56). Спектри ФЛ для вихідного зразка мають досить таки інтенсивну широку смугу у видимій області, яка при осажденні вихідного зразка в магнітному полі, стає менш інтенсивною. Спектри ФЛ для УДК ZnO мають слабку інтенсивність смуги у видимій області. А спектри ФЛ для УДК ZnO, осаджених в магнітному полі, практично не мають цієї смуги. При цьому екситона смуга з $\lambda_{\max}=402\text{nm}$ для всіх зразків залишається практично незмінною. При дії на зразки іонами кисню були отримані спектри іонолюмінесценції, які відрізняються від спектрів ФЛ. Аналіз спектральних характеристик, отриманих при впливі іонами кисню на кристали ZnO показує, що за інтенсивність широкої смуги у видимій області відповідальні дефекти, утворені іонами кисню.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: спектр, фотолумінесценція, іонолюмінесценція, магнітне поле, ZnO, ультрадисперсні кристали

В последнее время особый интерес представляют наноразмерные материалы, в которых могут наблюдаться размерные эффекты изменения свойств материалов из-за большого вклада поверхности. Получение и исследование материалов с новыми свойствами, при использовании нанотехнологий, позволяет совершить прорыв в этом направлении. В этой связи благодаря своим уникальным свойствам мелкодисперсные структуры на основе ZnO привлекают внимание различных исследовательских групп [1-4]. Оксид цинка является широкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3,37 эВ. Из [5] следует, что ширина запрещенной зоны наночастиц ZnO зависит и от их величины. Энергия связи экситона в ZnO равна 63 МэВ, это значительно выше, чем у широко известного полупроводника GaN (26МэВ). Рекомбинация экситонов в оксиде цинка при комнатной температуре обуславливает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 380–390 нм

[6,7]. Таким образом, повышенный интерес к оксиду цинка связан с возможностью создания светоизлучающих устройств, работающих в ближнем ультрафиолетовом диапазоне [7-9].

В настоящее время разработано множество методов получения наночастиц, как в рамках традиционной для микроэлектроники технологий (электрохимическое травление, метод тонко регулируемой конденсации из газовой фазы), так и создание новых технологических приемов (детонационный синтез, золь-гель технология, механосинтез и другие) [10,11]. В этих работах подчёркивается, что метод получения ультрадисперсных систем (УДС) имеет значительно большее влияние на их свойства, чем в случае макроскопических материалов. В дополнение к физическим характеристикам макроскопического объекта УДС характеризуются дисперсией частиц по размерам и качеством поверхности, а эти параметры, в значительной мере определяющие физико-химические свойства такой системы, зависят в сильной степени от метода получения. Это приводит к большим вариациям экспериментальных данных, получаемых различными исследователями. Поэтому представляет интерес исследовать образцы, полученные определенным методом. Исследование свойств мелкодисперсных кристаллов ZnO, полученных с помощью различных методов, открывает новые перспективы применения этого вещества.

Помимо выше упомянутых свойств у ZnO есть такие преимущества перед прочими широко зонными материалами, как радиационная стойкость. Также, технология получения ZnO гораздо проще, что является залогом низкой стоимости устройств на его основе. Актуальной на сегодняшний день является одна из важнейших проблем кристаллизации - получение ориентированных мелкодисперсных систем на не ориентированных подложках [12-14].

Цель данной работы заключается в исследовании оптических свойств мелкодисперсных систем ZnO, осаждённых на неориентированную подложку в магнитном поле.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Спектральные характеристики исследовались на высоковакуумной установке, технические параметры которой представлены в работе [15]. Экспериментальная установка позволяет изучать спектры ионнолюминесценции (ИЛ) и фотолюминесценции (ФЛ). Микрофотографии образцов получали на электронном микроскопе - JSM-6390LV. Коэффициент пропускания измеряли на спектрофотометре СФ-46, затем полученные данные использовали для определения ширины запрещённой зоны. Методика определения ширины запрещённой зоны полупроводников представлена в работах [16,17].

Мелкодисперсные кристаллы ZnO получали путём разделения на фракции в коллоидном растворе промышленного люминофора К-56. Коллоидный раствор выдерживался в пробирке не менее одного месяца. После этого для исследований использовалась 1/3 раствора из верхней части пробирки. Анализ микрофотографии промышленного люминофора (рис.1б) показывает, что размеры кристаллов находятся в пределах 500-10нм. Образцы для исследования наносились на подложку из нержавеющей стали в виде эмульсии ZnO водного раствора, затем вода удалялась путём выпаривания. Температура подложки поддерживалась в пределах 65°C. Такой режим выпаривания даёт возможность эффективнее удалить воду из образца и в то же время не способствует образованию конвективных потоков, которые не позволяют зафиксировать частицы в определённом положении. Процесс нанесения эмульсии производился 3-4 раза до образования матового налёта на подложке. Исследовались образцы ZnO, нанесенные на подложку, как обычным способом, так и в магнитном поле. Осаждение ультрадисперсных частиц проводили в магнитном поле с индукцией магнитного поля: 0,14 Тл, 0,20 Тл и 0,30Тл. После чего образец помещался в рабочую камеру. Индукция магнитного поля измерялась "измерителем магнитной индукции Ш1-8". Параметры ионной пушки: ускоряющее напряжение от 50 до 3000 В, ионный ток от 0,004 до 3,5 мА. Запись спектров производилась при комнатной температуре. Для сравнения записывались спектры ФЛ и спектры ионнолюминесценции, полученные при воздействии ионами кислорода на образец (ИЛ₀).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе применялись фотолюминесценция-ФЛ и низкоэнергетическая ионнолюминесценция ИЛ₀, которые являются весьма информативными и широко используются для изучения ультрадисперсных систем (УДС). На (рис.1а) представлены спектры ФЛ образцов исходного люминофора К-56 и спектры мелкодисперсных частиц ZnO, осаждённых в магнитном поле.

Полученные в данной работе спектры ФЛ промышленного люминофора ZnO (К-56) представлены рядом линий с длинами волн в максимуме: $E_1(\lambda_{\max}=379 \text{ нм})$, $E_2(\lambda_{\max}=388 \text{ нм})$, $E_3(\lambda_{\max}=395,5 \text{ нм})$, $E_4(\lambda_{\max}=401 \text{ нм})$, и широкой полосой в видимой области $E_7(\lambda_{\max}=510-540 \text{ нм})$ и охватывающей диапазон от 401 до 650 нм. Наблюдается различие между спектрами ФЛ для образцов нанесённых на подложку обычным способом и нанесенных в магнитном поле (рис. 1а). Из анализа спектров видно, что с увеличением интенсивности магнитного поля, в котором происходит осаждение УДС, улучшается структурированность спектральных линий. Так для линии E_1 наблюдается незначительное изменение интенсивности от 0,40 до 0,27(абсолютных единиц) и уменьшение полуширины полосы от $\Delta\lambda=7,0 \text{ нм}$ до $\Delta\lambda=6,0 \text{ нм}$. Спектральная линия E_2 также испытывает изменение интенсивности и уменьшение полуширины полосы от $\Delta\lambda=4,0 \text{ нм}$ до $\Delta\lambda=3,5 \text{ нм}$.

Наиболее интенсивная линия E_4 также становится более узкой (изменение полуширины от $\Delta\lambda=4,0$ нм до $\Delta\lambda=3,6$ нм).

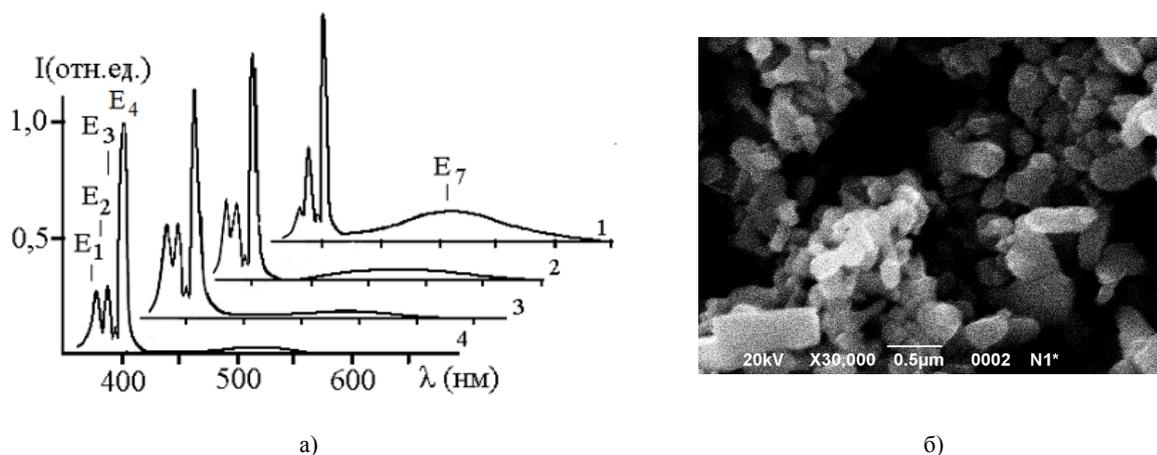


Рис.1. Спектры ФЛ мелкодисперсных частиц ZnO, осаждённых в магнитном поле и микрофотография исходного образца ZnO

а) 1-нанесение на подложку обычным способом промышленного люминофора К-56; 2 - магнитное поле с индукцией 0,14Тл; 3- магнитное поле с индукцией 0,20 Тл; 4- магнитное поле с индукцией 0,30 Тл; б) микрофотография исходного образца ZnO.

Интенсивность полосы E_7 уменьшается по мере увеличения интенсивности магнитного поля в котором происходит осаждение частиц ZnO. Низкая интенсивность спектральной полосы в видимой области говорит об улучшении кристаллической структуры данного образца ZnO. В литературе отмечается, что такие спектры соответствуют высокому структурному и оптическому качеству кристаллов [6-8]. Этому, видимо, способствует направленная определённым образом ориентация кристаллов в магнитном поле. Уровень поляризации ультрадисперсных кристаллов в данном случае выше, чем кристаллов исходного образца так, как согласно микрофотографии размеры УДК находятся в пределах 10-40 нм (рис.4). На поляризацию наночастиц в электрическом поле указывается и в работах [13-15], об ориентации УДК в магнитном поле информации не найдено.

При воздействии на люминофор К-56 и УДК ZnO ионами кислорода (энергия -3кэВ) были получены спектры ионolumинесценции (рис. 2), отличающиеся от спектров ФЛ (рис. 1а).

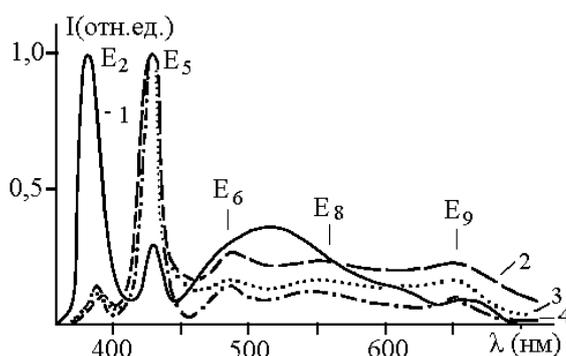


Рис. 2. Спектры ИЛ₀ образцов, полученных путём осаждения мелкодисперсных частиц ZnO в магнитном поле (для данных спектров энергия ионов кислорода 3кэВ)

1 - промышленного люминофора К-56, 2 - нанесение на подложку в магнитном поле с индукцией 0,14 Тл, 3- нанесение на подложку в магнитном поле с индукцией 0,20Тл, 4 - нанесение на подложку в магнитном поле с индукцией 0,30Тл

Спектры ИЛ₀ промышленного люминофора (К-56) ZnO представлены рядом линий с длинами волн в максимуме: E_2 ($\lambda_{\max}=382,5$ нм), E_5 ($\lambda_{\max}=426,8$ нм), E_7 ($\lambda_{\max}=512$ нм), E_9 ($\lambda_{\max}=654$ нм). Спектры ИЛ₀ УДК ZnO представлены линиями с длинами волн в максимуме: E_2 ($\lambda_{\max}=390$ нм), E_5 ($\lambda_{\max}=427$ нм), E_6 ($\lambda_{\max}=486$ нм), E_8 ($\lambda_{\max}=550$ нм), E_9 ($\lambda_{\max}=652,5$ нм). Из (рис.2) видно, что спектры УДК ZnO сильно отличаются как от спектра исходного образца, так и от спектров ФЛ ZnO (рис.1а). Спектры ИЛ₀ имеют более широкие линии, с полушириной линии от $\Delta\lambda=17,0$ до $\Delta\lambda=10,0$ нм для линии E_2 и от $\Delta\lambda=16,5$ нм до $\Delta\lambda=15,5$ нм для линии E_5 . Это также можно объяснить тем, что с увеличением напряжённости магнитного поля, при осаждении УДК ZnO, число частиц ZnO с определённой ориентацией увеличивается. Следует отметить, что линия E_2 и линия E_5 в

спектре исходного образца и спектрах УДК ZnO испытывают инверсию. Из спектров УДК ZnO видно, что интенсивность полос спектра в видимой области уменьшается при осаждении мелкодисперсных частиц ZnO в магнитном поле с большей напряжённостью. На рис. 4 представлена микрофотография УДК ZnO анализ которой показывает, что размеры частиц находятся в пределах 10-40нм. Частицы наноразмерных величин в большей степени преобретают определённую ориентацию в магнитном поле, что проявляется в спектральных характеристиках. Из этого можно сделать вывод, что осаждение УДК ZnO на подложку в магнитном поле улучшает оптические характеристики образца. Спектры УДК ZnO, полученные при воздействии ионами кислорода с энергией 1кэВ и 2кэВ имеют такой же вид, но хуже структурированность и интенсивность. На рис. 3 показана зависимость интенсивности спектральных линий ионolumинесценции от ускоряющего напряжения на ионной пушке (экспериментальные данные отмечены точками).

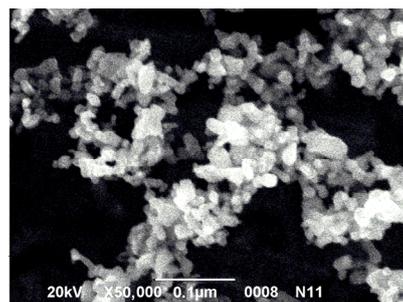
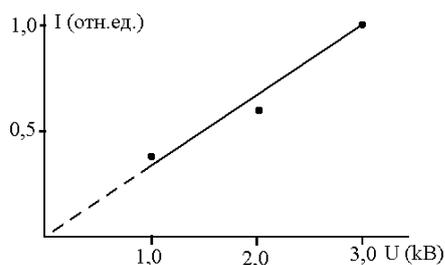


Рис. 3. Зависимость интенсивности ИЛ₀ от энергии ионов Рис. 4. Микрофотография мелкодисперсных кристаллов ZnO.

Отличие спектров ФЛ и ИЛ₀ можно объяснить тем, что ФЛ это объёмная люминесценция кристалла, а люминесценция вызванная ионами низких энергий (до 3кэВ) – поверхностная люминесценция. Ионы низких энергий ~1 кэВ рассеиваются почти полностью на поверхностном слое и широко используются для исследования "первого монослоя" атомов кристалла [18]. Глубина воздействия ультрафиолетового излучения на кристаллические материалы до нескольких микрон. Также необходимо учитывать, что механизм взаимодействия ионов с кристаллической решёткой твёрдого тела отличается от механизма взаимодействия электромагнитного поля УФ излучения с веществом.

В таблице представлены все основные спектральные параметры, полученные для исследуемых образцов.

Таблица

Параметры спектров, полученные при исследовании люминофора ZnO

	E ₁ (нм)	E ₂ (нм)	E ₃ (нм)	E ₄ (нм)	E ₅ (нм)	E ₆ (нм)	E ₇ (нм)	E ₈ (нм)	E ₉ (нм)
ФЛ _{исх}	379(0,13)	388,0(0,41) Δλ=4,8	395,0(0,12)	401,0(1,00) Δλ=4,0	.....	.....	510(0,14)	.....	.....
ФЛ _{удк} B=0,14Тл	379(0,37) Δλ=7,0	388,7(0,35) Δλ=4,0	395,0(0,12)	402,3(1,00) Δλ=4,0	.....	.....	525(0,06)	.....	.....
ФЛ _{удк} B=0,20Тл	379(0,40) Δλ=6,5	388,6(0,43) Δλ=4,0	395,5(0,12)	402,0(1,00) Δλ=4,0	.....	.....	525(0,03)	.....	.....
ФЛ _{удк} B=0,30Тл	379(0,27) Δλ=6,0	389,0(0,43) Δλ=3,5	395,5(0,12)	402,0(1,00) Δλ=3,6	.....	.....	525(0,02)	.....	.....
ИЛ _{исх}	.....	382,5(1,00) Δλ=17,0	.....	.....	426,8(0,32) Δλ=15,0	.....	512(0,36)	.....	654,0(0,10)
ИЛ _{удк} B=0,14Тл	.....	390,0(0,10) Δλ=12,0	.....	.....	427,0(1,00) Δλ=16,5	486(0,27)	.....	550(0,23)	652,5(0,24)
ИЛ _{удк} B=0,20Тл	.....	390,0(0,12) Δλ=10,7	.....	.....	427,0(1,00) Δλ=16,0	486(0,16)	.....	550(0,15)	652,5(0,16)
ИЛ _{удк} B=0,30Тл	.....	389,7(0,14) Δλ=10,0	.....	.....	427,0(1,00) Δλ=15,5	486(0,14)	.....	550(0,11)	652,5(0,10)

В скобках указана относительная интенсивность полос, ФЛ_{исх}. – фотolumинесценция промышленного образца К-56, ИЛ_{исх}. – ионolumинесценция промышленного образца К-56, ФЛ_{удк} – фотolumинесценция ультрадисперсных кристаллов, осаждённых на подложку в магнитном поле с индукцией B=0,14Тл, B=0,20Тл, B=0,30Тл, ИЛ_{удк} – ионolumинесценция ультрадисперсных кристаллов, осаждённых на подложку в магнитном поле с индукцией B=0,14Тл, B=0,20Тл, B=0,30Тл.

По данным УФ-спектроскопии ультрадисперсные кристаллы ZnO прозрачны в видимом диапазоне длин волн. Для того чтобы определить ширину запрещённой зоны УДК ZnO на спектрофотометре СФ-46 были определены коэффициенты пропускания в необходимой области длин волн для кварцевой подложки и ультрадисперсных кристаллов, нанесённых на кварцевую подложку. Коэффициенты пропускания определяли для фиксированных значений длин волн. Затем по известной методике определили коэффициенты поглощения

и построили графики в координатах $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ [16,17]. Значение ширины запрещённой зоны (E_g) получили путём линейной интерполяции прямолинейного участка графика на ось абсцисс.

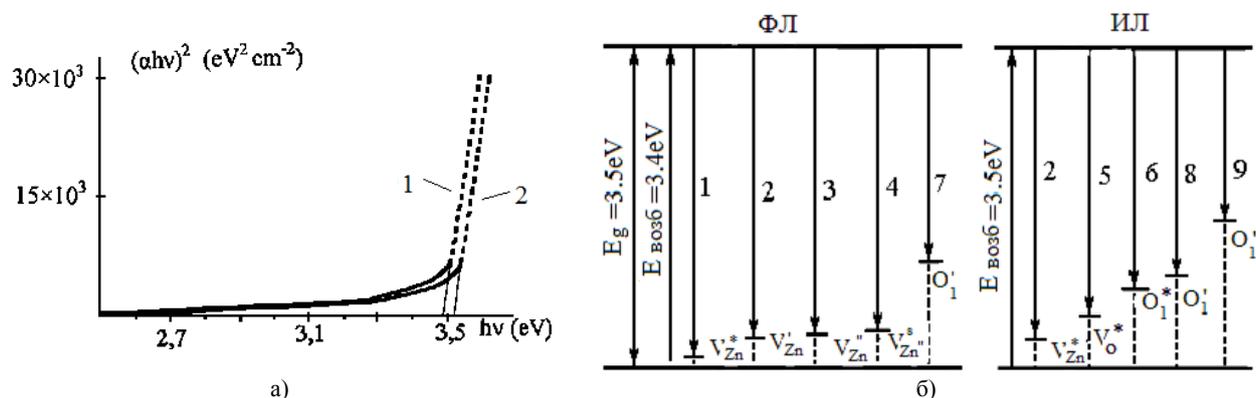


Рис. 5. Спектры поглощения образцов ZnO и электронные переходы при фото- и ионо-люминесценции.
а) определение ширины запрещённой зоны образцов в координатах $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$; 1 - исходный образец (K-56), 2 - УДК ZnO,
б) схема электронных переходов в ZnO при воздействии на образец ультрафиолетом и пучком ионов кислорода.

На рис. 5а показаны графики исходного и УДК ZnO. Значение ширины запрещённой зоны образца K-56 равно 3,49 эВ, а для УДК ZnO составляет 3,52 эВ при комнатной температуре. Наблюдается зависимость значения ширины запрещённой зоны E_g от размеров кристаллов, с уменьшением размеров УДК величина E_g растёт. Для более полного понимания процессов, происходящих при возбуждении ультрафиолетом ($\lambda_{\max}=365$ нм) и ионами кислорода (ИЛ₀) образцов ультрадисперсных кристаллов ZnO, предложена энергетическая диаграмма электронных переходов (рис. 5б). Как видно, при ФЛ преобладают “прямые” переходы зона-зона с излучением кванта света это линии E_1, E_2, E_3, E_4 . Излучение в видимой области линия E_7 с $\lambda_{\max}=525$ нм обусловлено дефектами кислородных вакансий. Штриховые линии показывают электронные безизлучательные переходы сопровождающиеся растратой энергии в тепло. При воздействии ионами кислорода на образец электронный переход зона-зона имеет малую вероятность, о чём свидетельствует интенсивность линии E_2 ($\lambda_{\max}=390$ нм). Ионная бомбардировка способствует образованию множества дефектов, созданных вакансиями кислорода, что подтверждается спектрами ИЛ₀ (линии E_5, E_6, E_8, E_9).

В данной работе было установлено, что осаждённые в магнитном поле кристаллы ZnO ультрадисперсных размеров значительно улучшают свои спектральные свойства. Эти спектры аналогичны спектрам, которые получают при использовании сверхчистых кристаллов с идеальной кристаллической решёткой [1,8,10,17,19]. В работе [17] отмечается, что ультрафиолетовое (UV) излучение проявляется в достаточно совершенных структурах с минимальным количеством дефектов, которые могут создавать конкурирующие каналы излучательной или безизлучательной рекомбинации. Поэтому соотношение интенсивностей UV и видимого излучения PL может служить мерой качества кристаллов ZnO. Причём в настоящей работе для этого использовалась не специально подготовленная подложка. Результаты работы показывают, что на неориентированной подложке, при осаждении УДК в магнитном, как и в электрическом [15], поле тоже можно получать образцы со спектральными параметрами близкими к параметрам для кристаллов высокой чистоты и идеальной кристаллической решёткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены спектры ФЛ и ИЛ₀ для ультрадисперсных систем ZnO, которые указывают на то, что при уменьшении размерности кристаллов до нано-размерных величин их структурные и оптические свойства улучшаются. Осаждение ультрадисперсных кристаллов на подложку в магнитном поле также ведёт к значительному улучшению оптических параметров. Это, видимо, связано с определённой ориентацией оптической оси мелкодисперсных кристаллов ZnO при осаждении их в магнитном поле. Показано, что для получения материалов с высокими оптическими свойствами не требуется специально подготовленная подложка, если УДК ZnO осаждать в магнитном поле. Полученные результаты также показывают, что уменьшение размерности кристаллов ведёт к увеличению ширины запрещённой зоны материала. Показано, что при осаждении ультрадисперсных кристаллов в магнитном поле можно получить материалы с оптическими параметрами не хуже, чем для сверхчистых кристаллов с идеальной кристаллической решёткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burakov V.S., Tarasenko N.V., Nevar E.A., Nedelko M.I. Morphology and optical properties of zinc oxide nanostructures synthesized by thermal and electric-spraying // Technical Physics. -2011. - Vol.81. - Vyp.2. -P.89-97.
2. Chaliapina A.Y., Khokhlov E.M., Polyakova L.A., Solovyova A.Yu. Synthesis and study of the properties of nanoparticles of zinc oxide// Vestnik MИTHT. -2011. -Vol.6. - No.6. -P.102-104 (in Russian).

3. Ostafiychuk B.K., Zhirovetsky V.M., Kotlyarchuk B.K., Moisa M.I., Popovych D.I., Serednitsky A.S. The study of processes the formation of nano ZnO and on its properties // *Physics and Chemistry of Solid State*.- 2008.-Vol.9. - No.4.-P.728-731(in Russian).
4. Sushchikh M., Styrov V., Tyutyunnikov V., Cordella N. Surface Luminescence of Polycrystallin Zinc oxide Excited by Hydrogen Atoms // *Mater. Res. Symp. Proc.* - 2007. - Vol.957. - P.0957-K07-02 .
5. Vakalov D.S., Krandievsky S.O., Mihneev L.V. The study of recombination centers of ZnO nanoparticles in the methods of optical, photoelectric and luminescent spectroscopy // *Vestnik NCSTU*.-2011. - No.4(29).-P.6-11 (in Russian).
6. Kuzmina I.P., Nikitenko V.A. Zinc oxide. Preparation and Optical Properties. - M.: Nauka, 1984.-166p (in Russian).
7. Nikitenko V.A. Optics and Spectroscopy of Point Defects in ZnO // *Proceeding of interational NATO Workshop "Zinc oxide as a material for micro-and optoelectronic application."*-Shringer, 2005.-P.69-81.
8. Kaidashev V.E., Kaidashev E.M., Perez M., Monteiro T., Correia M.R., Sobolev N.A. Optical and structural properties of the nanorods ZnO, obtained by pulsed laser deposition without catalyst // *Technical Physics*.-2009.- Vol.79. - Vyp.11.- P.45-49.
9. Li L.E., Demianets L.N. Room-temperature excitonic lasing in ZnO tetrapod-like crystallites // *Opt. materials*. - 2008. - Vol.30. No.7.-P.1074-1078.
10. Lyanguzov N.V., Kaidashev V.E., etc. The use of different catalysts for micro-laser deposition and ZnO nanorods // *Technical Physics*. - 2012. - Vol.82. -Vyp.4. - P.108-116.
11. Gusev A.I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology*.- M.: Fizmatlit, 2005. - 416 s. (in Russian).
12. Andrievsky R.A., Raguli A.V. *Nanostructured materials*.- M.: Izd.tsentr "Academy", 2005.-192p. (in Russian).
13. Malyshev K.V. The polarization of the nanoparticles in the tunneling microscope // *Science and education*. - 2011.- No.10. - P.1-13(in Russian). <http://technomag.edu.ru/pdf/out/228079.pdf>
14. Shirokov V.P., Biryukov S.V., Mukhortov V.M., Yuzyuk Y.I. The polarization of thin films of barium strontium titanate under the influence of an external electric field // *Technical Physics*.- 2011.-Vol.81. - Vyp.8.-P.115-121. (in Russian).
15. Tyutyunnikov V.I. Spectra of ZnO Superdispersed Paticles Polaized in an Electric Field//*East European Journal of Physics*.- 2015.-Vol.6.-No.3.-P.64-69.
16. Kulak A.I.,Streltsov E.A.,Rabchynski S.M. Band gap determination of semiconductor electrodes from photopotential spectrum//*Sviridov Readings*.- Iss.7.-Minsk.-2011.-P.1-10.
17. Troshin A.V., Kovalenko A.A., Dorofeev S.H., BaranovA.N. Sensitization ZnO nanorods CdSe quantum dots// *Inorganic materials*.-2012.-V48.-No7.-P.1-8. (in Russian).
18. Oura K., Lifshiz V.H., Saranin A.A. and other . *Introduction to the physics of surface* .- M.: Nauka, 2006 - 490 p. (in Russian).
19. Khomchenko V.S., Roshchina N.N., Zavyalov L.V., Strelchuk V.V., Svechnikov G.S., Tatyanyenko N.P., Gromashevskiy V.L., Lytvyn O.S., Avramenko E.A., Snopok B.A. Investigation of the structure, and the emission properties of piezoelectric films ZnS, ZnS-ZnO and ZnO, obtained by chemical method // *Technical Physics*. - 2014. - Vol.84. - Vyp.1. - P.94-103. (in Russian).