

PACS: 73.90.+f

SPECTRA OF ZnO SUPERDISPERSED PARTICLES POLARIZED IN AN ELECTRIC FIELD

V.I. Tyutyunnikov

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

Received October 10, 2015

This paper discusses the spectra of photo - and ion-luminescence (PL and IL) of ultrafine crystals (UDC) ZnO deposited on the substrate in an electric 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 electric 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 electric 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, electric field, and ultrafine crystals

СПЕКТРЫ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ZnO ПОЛЯРИЗОВАННЫХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Тютюнный В.И.

*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, осажденных на подложку в электрическом 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 электрическом поле, становится менее интенсивной. Спектры ФЛ для УДК ZnO имеют слабую интенсивность полосы в видимой области. А спектры ФЛ для УДК ZnO, осажденных в электрическом поле, практически не имеют этой полосы. При этом экситонная полоса с $\lambda_{\max}=401\text{nm}$ 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, электрическое поле, ультрадисперсные кристаллы

СПЕКТРИ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК ZnO ПОЛЯРИЗОВАНИХ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Тютюнный В.И.

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

В даній роботі розглядаються спектри фото - та іонолюмінесценції (ФЛ та ИЛ) ультрадисперсних кристалів (УДК) ZnO, осаджених на основу в електричному 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 осадженні вихідного зразка в електричному полі, стає менш інтенсивною. Спектри ФЛ для УДК ZnO мають слабку інтенсивність смуги у видимій області. А спектри ФЛ для УДК ZnO, осаджених в електричному полі, практично не мають цієї смуги. При цьому екситона смуга з $\lambda_{\max}=401\text{nm}$ 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, електричне поле, ультрадисперсні кристали

На протяжении последних лет внимание различных исследовательских групп сосредоточено на исследовании ультрадисперсных структур на основе ZnO [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 (26 мэВ). 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 характеризуется 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, открывают 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 это получение ориентированных мелкодисперсных систем на не ориентирующих подложках [12-14].

Цель данной работы заключается в исследовании оптических свойств мелкодисперсных систем осаждённых на не ориентированную подложку в электрическом поле.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Спектральные характеристики исследовались на установке, представленной на рис. 1. Экспериментальная установка позволяет изучать спектры ионнолюминесценции (ИЛ) и фотолюминесценции (ФЛ). Вакуумная часть установки состоит из рабочей камеры (1) и системы откачки. Предварительная откачка осуществлялась форвакуумным (6) и диффузионным (5) насосами. Вакуум контролировался термопарной и ионизационной лампами (11,12). Масляные ловушки (8,9) заливались жидким азотом, при этом пары из диффузионного и форвакуумного насосов конденсировались на стенках ловушек, что предотвращало попадание масла в рабочую камеру. При достижении вакуума в системе 10^{-3} Па, форвакуумный и диффузионный насосы отсекались от рабочей камеры. Более глубокий безмасляный вакуум достигался окончательной откачкой блоком магниторазрядных насосов (НМДО-0.4 и НМДО-0.25) (7), общей производительностью 1050 л/с, что позволяло получить в рабочей камере вакуум не хуже 10^{-5} Па. Давление в рабочей камере контролировалось при помощи вакуумметра ВМБ-14 с магнитоионизационным датчиком ПММ-32-1 (17), а масс-спектрометр МХ-7304 (16) позволяет контролировать состав газа в рабочей камере. Исследуемый образец (3) наносился на подложку (2). Нагревательный элемент (4) позволяет регулировать температуру образца от комнатной до 800 К, а медная шина, соединяющая подложку с криостатом, даёт возможность понижать температуру образца жидким азотом до 80 К. Спектры записывались с помощью монохроматора ЗМР-3 (обратная дисперсия в синей области спектра 0,5 нм/мм) (21). В качестве регистрирующего устройства использовали ФЭУ 84-3 (22). Сигнал с ФЭУ усиливался усилителем У-5-11 (25) и записывался на КСП-4 (26). Ионная пушка (18) обеспечивала плотность ионного тока до 3 мкА/см² и энергию ионов от 0,5 до 3,0 кэВ для возбуждения ИЛ. Диссоциация молекул газа в ионной пушке (18) происходила в поле высокочастотного разряда (40 МГц), создаваемого генератором УВЧ-66 (19). Для возбуждения ФЛ использовалась линия 365нм, которая выделялась светофильтром УФС-2 из светового потока лампы ДРШ-250 (23).

Микрофотографии образцов получали на электронном микроскопе- JSM-6390LV.

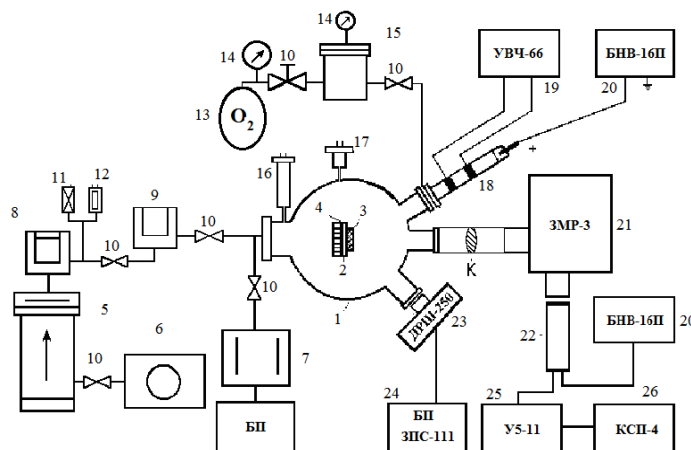


Рис.1. Основные узлы рабочей установки

Мелкодисперсные кристаллы ZnO-Zn 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 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. Исследовались образцы ZnO, нанесенные на подложку, как обычным способом, так и в электрическом поле. Напряжённость электрического поля составляла 10^5 В/м. После чего образец помещался в рабочую камеру. Запись спектров производилась при комнатной температуре. Для сравнения записывались спектры ФЛ и спектры ионolumинесценции, полученных при воздействии ионами кислорода на образец, (ИЛ₀) промышленного образца К-56.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Неразрушающие методы исследования (ФЛ и низкоэнергетическая ИЛ₀) являются весьма информативными и широко используются для изучения ультрадисперсных систем. На рис.2 представлены спектры ФЛ образцов исходного люминофора К-56

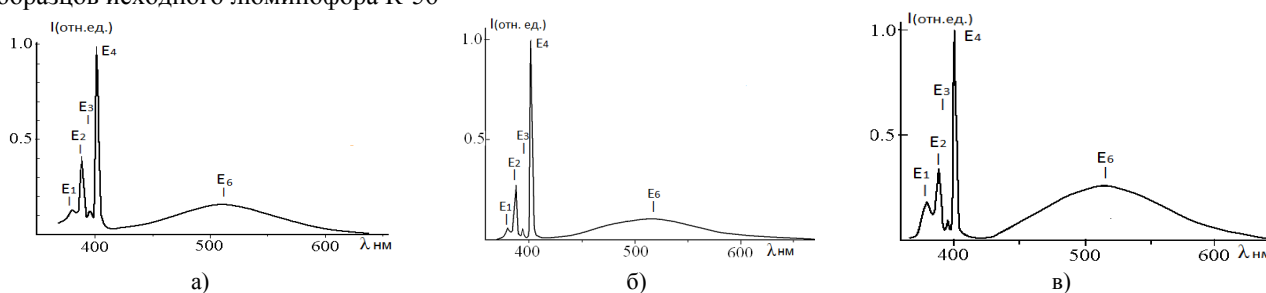


Рис.2. Спектры ФЛ промышленного люминофора К-56 (ZnO)

а) нанесение на подложку обычным способом, б) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м
в) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м после воздействия ионами кислорода (энергией 3КэВ) в течение 20 минут.

При обработке люминофора К-56 ионами кислорода (энергия 3кэВ) были получены спектры, отличающиеся от спектров ФЛ рис. 3. Особенности этих спектров рассматриваются ниже.

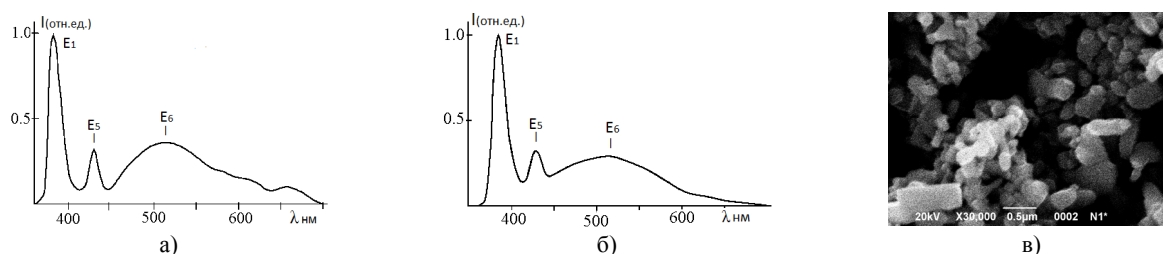


Рис.3. Спектры ИЛ₀ промышленного люминофора К-56 (ZnO)

а) нанесение на подложку обычным способом, б) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м,
в) микрофотография исходного образца ZnO.

Спектры ФЛ для ультрадисперсных частиц ZnO, нанесённых на подложку обычным способом и в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м, представлены на рис. 4.

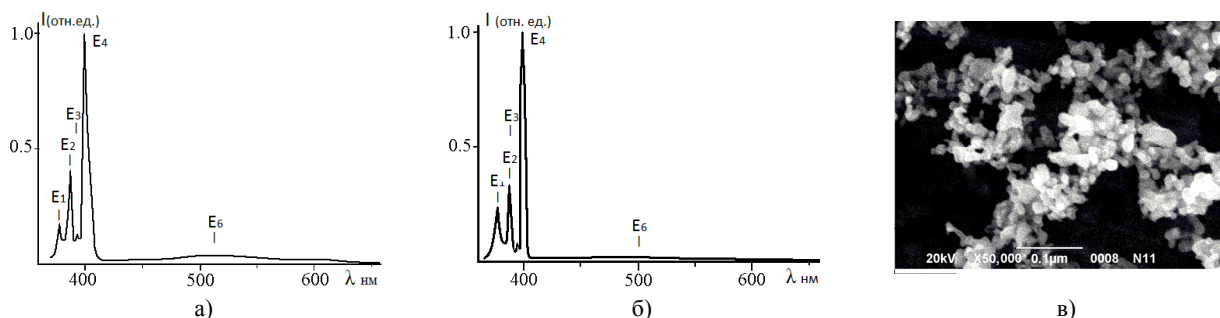
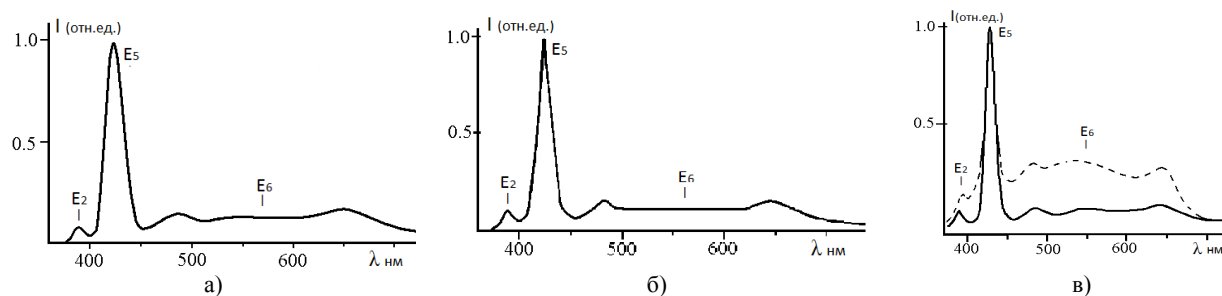


Рис. 4. Спектры ФЛ ультрадисперсных частиц ZnO

а) нанесение на подложку обычным способом, б) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м,
в) микрофотография мелкодисперсных кристаллов ZnO.

Спектры ИЛ₀ ультрадисперсных частиц ZnO, полученные для образцов, нанесённых на подложку обычным способом и в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м. также имели свои особенности рис. 5.

Рис.5. Спектры ИЛ₀ ультрадисперсных частиц ZnO

а) нанесение на подложку обычным способом, б) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м, в) нанесение на подложку в электрическом поле напряжённостью 10^5 В/м: после воздействия ионами кислорода 30 мин – пунктирная линия и после прогрева до 700 К с последующим охлаждением до комнатной температуры – сплошная линия

Полученные в данной работе спектры промышленного люминофора ZnO (К-56) представлены рядом линий с длинами волн в максимуме: $E_1(\lambda_{\max}=379,6\text{нм})$, $E_2(\lambda_{\max}=388\text{нм})$, $E_3(\lambda_{\max}=395,5\text{нм})$, $E_4(\lambda_{\max}=401\text{нм})$, $E_5(\lambda_{\max}=426,8\text{нм})$ и широкой полосой в видимой области $E_6(\lambda_{\max}=510\text{-}540\text{нм})$ и охватывающей диапазон от 401 до 650 нм. Наблюдается различие между спектрами ФЛ для образцов нанесённых на подложку обычным способом (рис. 2а) и нанесённых в электростатическом поле (рис. 2б). Из анализа спектров видно, что линии спектра в фиолетовой области имеют близкие параметры (для самой интенсивной линии с $\lambda_{\max}=401\text{нм}$ имеем полуширину $\Delta\lambda\approx 3\text{нм}$). Интенсивность полосы E_6 для образцов, осаждённых в электростатическом поле, меньше, чем для образцов, осаждённых обычным способом (рис. 2а,б). Не значительное изменение интенсивности полосы E_6 (рис. 2б) видимо связано с частичной поляризацией частиц ZnO. На поляризацию наночастиц в электрическом поле указывается и в работах [13-16]. До настоящего времени остаётся открытым вопрос о природе центров, ответственных за полосу, охватывающей зелёную и красную область, в нашем случае полоса E_6 (длина волны в максимуме $\lambda_{\max}\approx 510\text{-}540\text{нм}$). Одни источники связывают эту полосу с однократно заряженными вакансиями кислорода [1,6], другие с неконтролируемой примесью меди [17]. В работе [17] проведено легирование медью монокристаллических плёнок ZnO высокого качества путём термической диффузии, и исследованы их люминесцентные свойства методом катодоллюминесценции. Отмечается, что легирование медью приводит к увеличению интенсивности зелёной полосы спектра катодоллюминесценции, положение максимума, ширина и форма которой при 78 и 300К остаются неизменными. В работах [1,6] говорится, что за люминесценцию в зелёной и красной области ответственны дефекты, образованные вакансиями кислорода. В данной работе образец исходного ZnO (промышленного люминофора К-56) обрабатывался ионами кислорода с энергией 3кВ, в течении двадцати минут, после чего интенсивность полосы ФЛ (E_6) в видимой области значительно увеличилась (рис. 2в). После прогрева образца до 700К в вакууме (с последующим охлаждением до комнатной температуры) спектр ФЛ ZnO принимает первоначальный вид (рис. 2а), что говорит о том, что дефекты, ответственные за линию в видимой области спектра, создаются ионами кислорода.

Спектр ИЛ исходного образца, при воздействии ионами кислорода с энергией 3кэВ, имеет совершенно иной вид (рис. 3а,б). В фиолетовой области возникает интенсивная полоса E_1 с $\lambda_{\max}=382,5\text{нм}$ (1,0) и полушириной $\Delta\lambda=16\text{нм}$. В синей области полоса E_5 с $\lambda_{\max}=426,8\text{нм}$ (0,32) и полушириной $\Delta\lambda=16\text{нм}$ по своей интенсивности имеет близкие параметры к интенсивности полосы в видимой области E_6 с $\lambda_{\max}=512\text{нм}$ и $\Delta\lambda\sim 130\text{нм}$. Эти данные показывают, что воздействие ионов кислорода на кристаллы ZnO, влияют на вид спектров. Это видимо связано с избытком кислорода от стехиометрического состава материала. Нельзя также исключать и влияние адсорбированного кислорода на поверхности кристаллов. Не менее интересные результаты были получены при исследовании УДС ZnO. Как видно из спектров ФЛ, полученные УДС обладают высокой интенсивностью линии E_4 в ультрафиолетовой области спектра с длиной волны $\lambda_{\max}=401\text{нм}$, и низкой интенсивностью в видимой области (рис. 4а). При этом, для образцов полученных осаждением в электрическом поле, интенсивность полосы в видимой области спектра незначительна (рис. 4б). Такие спектры соответствуют высокому структурному и оптическому качеству кристаллов [6-8]. Этому, видимо, способствует направленная ориентация кристаллов в электрическом поле. Уровень поляризации кристаллов в данном случае выше, так как согласно микрофотографии размеры кристаллов находятся в пределах 10-40нм (рис. 4а). При воздействии ионами кислорода на УДС ZnO, полученный спектр в фиолетовом диапазоне имеет спектральную линию E_2 слабой интенсивности (0,1) с $\lambda_{\max}=389\text{нм}$ и полушириной $\Delta\lambda=14,0\text{нм}$. В синей области имеем интенсивную линию E_5 с $\lambda_{\max}=423,5\text{нм}$ и полушириной $\Delta\lambda=16,0\text{нм}$. (рис. 5а,б). Интенсивность полосы в видимой области слабая ($\sim 0,1$). На рис. 5в представлены спектры ИЛ₀ образца, нанесённого на подложку в электрическом поле после воздействия ионами кислорода 30 мин – пунктирная линия и после прогрева до 700К, с последующим охлаждением – сплошная линия. Положение линий E_2 ($\lambda_{\max}=389\text{нм}$) и E_5 ($\lambda_{\max}=423,5\text{нм}$) осталось неизменным, а изменение интенсивности полосы E_6 показало, что на интенсивность этой полосы

вливают дефекты, образованные ионами кислорода. 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)
ФЛ _{ИСХ}	379,6 (0,13)	388 (0,41)	395,5 (0,12)	401 (1,00)	—	510 (0,14)
ФЛ _{ИСХ} (КОНД)	379,6 (0,06)	388 (0,28) Δλ=2,8	395,5 (0,06)	401 (1,00) Δλ=4,0	—	514 (0,10)
ФЛ _{ИСХ} (КОНД) после ИЛ	379,6 (0,18)	388 (0,33) Δλ=2,7	395,5 (0,10)	401 (1,00) Δλ=3,1	—	514 (0,25)
ИЛ _{ИСХ}	382,5 (1,0) Δλ=16,0	—	—	—	426,8 (0,32) Δλ=16,0	512 (0,36)
ИЛ _{ИСХ} (КОНД)	385,5 (1,0) Δλ=17,0	—	—	—	426,8 (0,37) Δλ=17,0	512 (0,34)
ФЛ _{УДК}	379, (0,20) Δλ=6,0	388 (0,44) Δλ=3,0	395,5 (0,15)	401 (1,00) Δλ=3,5	—	—
ФЛ _{УДК} (КОНД)	378 (0,23) Δλ=5,0	387,7 (0,33) Δλ=2,5	395,5 (0,07)	400,5 (1,00) Δλ=3,0	—	—
ИЛ _{УДК}	—	389 (0,09) Δλ=14,0	—	—	423,5 (1,00) Δλ=16,0	547 (0,13)
ИЛ _{УДК} (КОНД)	—	389 (0,1) Δλ=13,5	—	—	423,5 (1,00) Δλ=15,0	550 (0,1)

В скобках () указана относительная интенсивность полос,

ФЛ_{ИСХ} (конд) после ИЛ_О – фотолюминесценция промышленного образца К-56, осаждённого на подложку в электрическом поле напряжённостью 10⁵ В/м, после воздействия ионами кислорода на образец

ИЛ_{ИСХ}(конд) – ионOLUMИНЕСЦЕНЦИЯ промышленного образца К-56, осаждённого на подложку в электрическом поле напряжённостью 10⁵ В/м,.

ФЛ_{УДК} (конд) – фотолюминесценция ультрадисперсных кристаллов, осаждённых на подложку в электрическом поле напряжённостью 10⁵ В/м.

ИЛ_О удк (конд) – ионOLUMИНЕСЦЕНЦИЯ ультрадисперсных кристаллов, осаждённых на подложку в электрическом поле напряжённостью 10⁵ В/м.

В данной работе было установлено, что осаждённые в электрическом поле кристаллы ZnO ультрадисперсных размеров значительно улучшают свои спектральные свойства. Эти спектры аналогичны спектрам, которые получают при использовании сверхчистых кристаллов с идеальной кристаллической решёткой [1,8,10,18,19]. В работе [18] 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. Анализ спектров ионOLUMИНЕСЦЕНЦИИ и фотолюминесценции показал, что за спектр в видимой области спектра ответственны также дефекты, образованные ионами кислорода. В работе [19] также подчёркивается, что видимую люминесценцию ZnO (пик 550 нм) связывают с наличием глубоких дефектов, обычно кислородных вакансий и междоузельных атомов цинка. Результаты работы показывают, что на неориентированной подложке тоже можно получать образцы со спектральными параметрами близкими к параметрам для кристаллов высокой чистоты и идеальной кристаллической решёткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены спектры ФЛ и ИЛ_О для ультрадисперсных систем ZnO (К-56), 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 электрическом поле также ведёт к значительному улучшению оптических параметров. Это, видимо, связано с определённой ориентацией оптической оси мелкодисперсных кристаллов ZnO при осаждении их в электрическом поле. Изменение вида спектров при воздействии ионами кислорода на кристаллы ZnO показало, что за интенсивность широкой полосы в видимой области ответственны дефекты, образованные ионами кислорода. Показано, что при осаждении ультрадисперсных кристаллов в электрическом поле можно получить УДС с оптическими параметрами не хуже, чем для сверхчистых кристаллов с идеальной кристаллической решёткой.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

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. AY Solovyova A.Yu. Synthesis and study of the properties of nanoparticles of zinc oxide// *Vestnik MITHT*.-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. Michael Sushchikh, Vladislav Styrov, Vladimir Tyutyunnikov, Nick Cordella. Surface Luminescence of Polycrystalline 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 international 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.
15. Zonghai Hu, Michael D. Fischbein, Claudia Querner, and Marija Drndic. Electric-Field-Driven Accumulation and Alignment of CdSe and CdTe Nanorods in Nanoscale Devices // *Nano letters*. - 2006. - Vol.6. - No.11. - P.2585-2591.
16. Kevin M. Ryan, Alex Mastroianni, Kmani A. Stancil, Haitao Liu, A.P. Alivisatos. Electric-Field-Assisted Assembly of Perpendicular oriented Nanorod Superlattices // *Nano letters*. - 2006. - Vol.6. - No.7. - P.1479-1482.
17. Alimov YA.I, Chukichev M.V., Nikitenko V.A. The green luminescence band film of zinc oxide doped with copper in the process of thermal diffusion // *Semiconductors*. - 2004. - Vol.38. - Vyp.1. - P.34-38.
18. Troshin A.V., Kovalenko A.A., Dorofeev S.G., Baranov A.N. Sensitization ZnO nanorods CdSe quantum dots // *Inorganic materials*. - 2012. - Vol.48. - No.7. - P.1-8. (in Russian).
19. Khomchenko V.S., Roshchina N.N., Zavyalov L.V., Strelchuk V.V., Svechnikov G.S., Tatyanyanenko 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.