

УДК 535.31; 539.21

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ПЛЕНКИ ZnO:Ga

Н.Р. АГАМАЛЯН, Р.К. ОВСЕПЯН, И.А. ГАМБАРЯН,
Е.А. КАФАДАРЯН, С.И. ПЕТРОСЯН, Г.Р. БАДАЛЯН, А.К. ШИРИНЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 14 мая 2009 г.)

Прозрачные, проводящие, чистые и легированные галлием пленки ZnO, изготовленные электронно-лучевым напылением в вакууме, облучались при комнатной температуре источником Co^{60} со средней энергией γ -фотонов 1.25 МэВ и различными дозами вплоть до ~ 600 кГр. Определены ширина запрещенной зоны E_g , удельное сопротивление и плотность носителей, а также структурные параметры чистых и легированных пленок ZnO в зависимости от концентрации примеси и γ -дозы для того, чтобы оценить вызванную облучением деградацию пленок, используемых в качестве прозрачных электродов в электрооптических устройствах.

1. Введение

Прозрачные, проводящие оксидные пленки рассматриваются как один из наиболее важных компонентов светодиодов, солнечных элементов, плоских дисплеев и других современных оптоэлектронных устройств [1]. Принадлежащий к семейству полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ оксид цинка (ZnO) является собственным полупроводником n -типа с широкой запрещенной зоной (~ 3.3 эВ). Пленки ZnO с высокой концентрацией кислородных вакансий имеют удельное сопротивление $\sim 10^{-2}$ Ом см и оптическое пропускание около 90%, но являются нестабильными при высокой температуре и в окисляющей среде. Поэтому для практических применений предпочтительней пленки ZnO, легированные элементами III группы (Al, Ga или In). Легированные галлием пленки ZnO имеют оптимальные характеристики для прозрачных проводящих оксидов – оптическую ширину запрещенной зоны ~ 4 эВ и удельное сопротивление $\sim 10^{-4}$ Ом см [2].

Для получения этих пленок используются различные технологии: магнетронное, электронно-лучевое и лазерное напыления, золь-гель технология, металлоорганическое химическое осаждение (MOCVD) и др. Среди них вакуумное электронно-лучевое напыление является наиболее подходящим для получения прозрачных проводящих пленок без дополнительной послеростовой обработки.

В условиях проникающей радиации, а также в специфических условиях космического пространства радиационная стойкость материалов является чрезвычайно важной характеристикой. Помимо собственных точечных дефектов и дислокаций, возникающих в ходе синтеза пленок, наиболее важным источником накопления точечных дефектов является проникающая радиация. Пороговая энергия смещения для обоих атомов Zn и O в ZnO оценивается в 57 эВ [3,4]. Максимальная энергия передачи 1 МэВ-ного фотона составляет порядка десятков эВ, поэтому создание междоузельных ионов и вакансий посредством прямого упругого столкновения с γ -фотонами является маловероятным [4]. Основным эффектом γ -облучения предполагается ионизация атомов в решетке и собственных дефектов, которая может привести к смещениям, изменению связей или изменению зарядовых состояний. Эти явления вызывают изменения основных электрофизических параметров полупроводников и устройств на их основе. Ряд работ посвящен исследованию радиационной стойкости поликристаллического и монокристаллического ZnO при облучении электронами [5-10], протонами [6,10,11] и тяжелыми ионами [12,13], а также пленок ZnO и устройств на их основе под действием γ -облучения [4,14-16]. В результате многих исследований показано, что ZnO является более стойким к радиационным повреждениям, чем другие полупроводниковые материалы, такие как Si, GaAs, CdS, и даже GaN [17].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния γ -облучения на структурные, оптические и электрические свойства прозрачных проводящих чистых и легированных Ga пленок ZnO, которые пригодны в качестве прозрачных электродов в солнечных элементах и других устройствах. Исследование образцов проводилось с использованием рентгеновского дифракционного анализа, измерений электрического удельного сопротивления, оптического поглощения и отражения.

2. Методика эксперимента

Чистые и легированные галлием пленки ZnO были получены методом вакуумного электронно-лучевого напыления на подложках из оптического стекла и сапфира с ориентацией (0001) [18]. Синтезированные керамические таблетки чистого и легированного ZnO использовались в качестве мишеней для напыления. Все образцы были изготовлены в одинаковых условиях: энергия электронов соответствовала ~6 кэВ, температура подложки поддерживалась при $250 \pm 1^\circ\text{C}$ и скорость роста составляла $1.45 \text{ \AA/s}$. Полученные пленки ZnO были прозрачными, проводящими и имели высокую механическую прочность. Толщина пленок измерялась профилометром Stylus и проверялась интерференционным методом [19]. Элементный состав пленок определялся сканирующим электронным микроскопом с микроаналитической системой INCA Energy 300. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием рентгеновского дифрактометра с излучением Cu K_α ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$).

Образцы пленок площадью 1 см^2 облучались источником Co^{60} со средней энергией γ -фотонов 1.25 МэВ. Пленки были подвергнуты облучению с различной экспозицией при скорости 21 Гр/мин для достижения интегральных поглощенных доз от 0.84 до 589.52 кГр, которые выше обычно используемых в эксперименте при облучении полупроводниковых устройств [20]. Спектры пропускания, поглощения и отражения регистрировались при комнатной температуре с использованием УФ, видимого и ИК спектрофотометров. Измерения удельного сопротивления на постоянном токе осуществлялись четырехзондовым методом.

3. Результаты и обсуждение

Кристалличность образцов до и после облучения исследовалась с использованием рентгеноструктурного анализа. Все образцы имели преимущественную ориентацию вдоль оси (0002). Определялись интенсивность и ширина на полувысоте (FWHM) пика (0002), а также параметр ячейки c . Результаты измерения последнего для необлученных пленок представлены в таблице. Величина FWHM пика (0002) для чистых и легированных галлием (0.9 и 1.3 ат%) пленок ZnO близка к $20'$. Когда концентрация Ga увеличивается до 6.6 ат% и 9.3 ат%, значение FWHM увеличивается и достигает соответственно $\sim 24'$ и $\sim 30'$. Интенсивность и ширина на полувысоте (FWHM) пика (0002) для всех пленок остаются практически неизменными под действием γ -облучения, т.е. размер кристаллитов в пленках не меняется от облучения. Параметр решетки c необлученных образцов незначительно изменяется от легирования малыми концентрациями Ga (0.9 и 1.3 ат%) по отношению к параметру решетки чистых пленок, который составляет от 5.190 до 5.195 Å в зависимости от типа подложек. Для необлученных пленок с высоким уровнем легирования примесью Ga (соответственно, 6.6 ат% на стеклянной подложке и 9.3 ат% на подложке из сапфира) параметр решетки c составляет 5.219 Å, т.е. имеет место растяжение элементарной ячейки вдоль оси (0002). Все облученные пленки на стеклянной подложке показывают некоторое увеличение параметра c . Например, при максимальной дозе облучения он составляет 5.227 Å для образца с концентрацией 6.6 ат% Ga. В то же время облученные пленки на подложке из сапфира демонстрируют уменьшение этого параметра: например, от 5.196 Å до 5.190 Å и от 5.219 Å до 5.209 Å, соответственно, для концентраций примеси Ga 1.3 ат% и 9.3 ат%. Это свидетельствует о некотором искажении (растяжении и сжатии) элементарной ячейки вдоль оси (0002) при облучении.

Спектры оптического пропускания T и отражения R чистых и легированных пленок ZnO регистрировались в зависимости от энергии фотонов $\hbar\omega$ в области длин волн 0.3–50 мкм. Спектры пропускания для всех образцов показывают высокую прозрачность в видимой области спектра с интерференционными полосами и резким УФ краем поглощения. Коэффициент поглощения определялся из пропускания по формуле

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d \ln[(1-R)^2/T]}, \quad (1)$$

где d – толщина пленки. Исследование оптического поглощения показало, что зависимости $(\alpha h\omega)^2$ от $h\omega$ имеют прямозонный характер для всех образцов. Полученные значения ширины запрещенной зоны E_g необлученных образцов пленок приведены в табл.1. Согласно этим данным, E_g увеличивается от ~3.29 эВ для чистых пленок ZnO до ~3.98 эВ для ZnO:Ga (6.6 ат%) пленок. Обычно голубой сдвиг края поглощения с увеличением ширины зоны связывается с увеличением концентрации носителей (сдвиг Бурштейна–Мосса [21,22]). Эти результаты показывают, что атомы Ga являются донорами и увеличивают плотность электронов в зоне проводимости.

Табл.1. Содержание примеси, толщина пленки d , параметр решетки c и ширина на полувысоте (FWHM) пика (0002), ширина запрещенной зоны E_g , эмпирический параметр E_0 , удельное электрическое сопротивление ρ и концентрация носителей N необлученных чистых и ZnO:Ga пленок на подложках из стекла (gl) и сапфира (sap).

Impurity, at%	d , nm	FWHM (0002) peak, min	c , Å	E_g , eV	E_0 , meV	ρ , Ω cm	N , $\times 10^{20}$ cm ⁻³	$\rho(\text{FIR})$, Ω cm
Pure/gl	335	22	5.19	3.32	113	5.36×10^{-3}	-	-
Pure/gl	640	20	5.192	3.29	86	2.43×10^{-3}	-	-
Ga,0.9%/gl	950	19	5.195	3.52	202	3.80×10^{-4}	1.11	3.18×10^{-4}
Ga,0.9%/gl	350	19	5.193	3.56	193	4.90×10^{-4}	1.25	7.5×10^{-4}
Ga,6.6%/gl	565	24	5.219	3.98	408	4.52×10^{-4}	5.38	2.15×10^{-4}
pure/sap	530	22	5.199	3.28	81	2.5×10^{-2}	-	-
Ga,1.3%/sap	590	18	5.196	3.59	218	4.54×10^{-4}	1.62	2.6×10^{-4}
Ga,3.4%/sap	495	21	5.209	3.95	363	2.48×10^{-4}	5.16	1.37×10^{-4}
Ga,9.3%/sap	530	30	5.218	3.90	659	4.77×10^{-4}	4.59	2.66×10^{-4}

Уширение зоны ΔE_g (разница в ширинах запрещенной зоны между легированной и чистой пленками ZnO) связано с концентрацией носителей N следующим выражением:

$$\Delta E_g = h^2 N^{2/3} / [8m^* (\pi/3)^{2/3}], \quad (2)$$

где m^* – эффективная масса электрона, равная $0.35 m_e$ для пленок ZnO, легированных донорными атомами. Результаты расчетов концентрации

носителей N необлученных образцов приведены в табл.1. Данные измерений E_g и N , представленные в таблице, показывают, что они являются типичными для прозрачных проводящих оксидных пленок [1].

Результаты исследования изменений края оптического поглощения пленок на подложках из стекла и сапфира под действием γ -облучения показаны на рис.1 и 2. Необходимо подчеркнуть отсутствие сколько-нибудь заметных изменений в ширине запрещенной зоны вследствие облучения, предполагающее неизменность основной кристаллической решетки ZnO. Это согласуется со структурными данными. Край оптического поглощения пленок ZnO остается неизменным после облучения пучками ионов Au с энергией 120 МэВ, в то время как оптическое пропускание слегка уменьшается [13]. Уменьшение оптического пропускания из-за облучения объясняется здесь увеличением отношения металла к кислороду (Zn/O), приводящим к увеличению плотности носителей.

Коэффициент поглощения α вблизи края поглощения в области энергий $\hbar\omega < E_g$ следует экспоненциальному закону, т.е. урбаховскому краю:

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 \exp \frac{\hbar\omega}{E_0}. \quad (3)$$

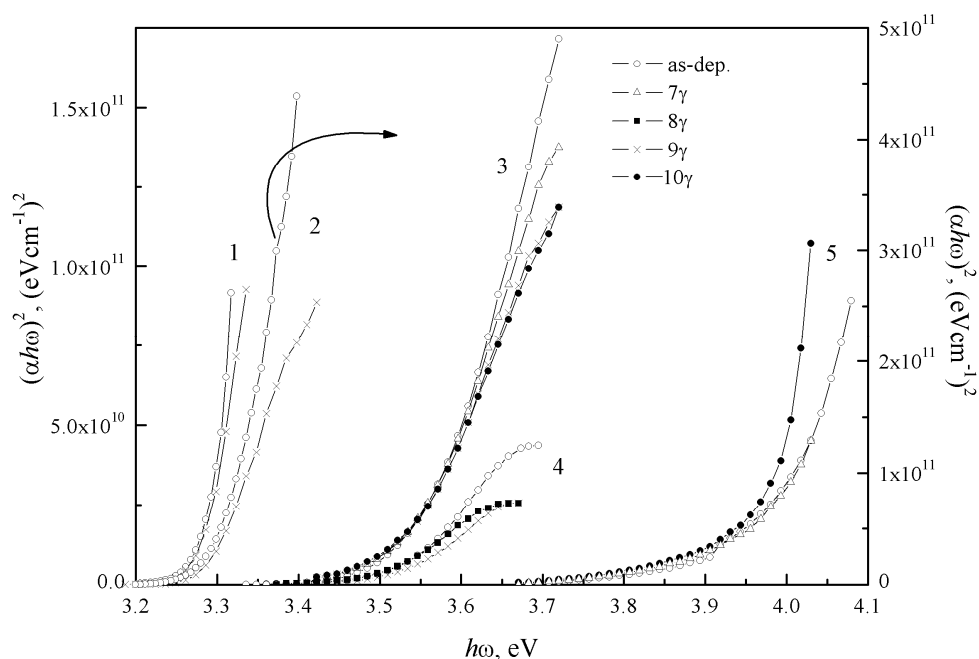


Рис.1. Зависимости $(\alpha\hbar\omega)^2$ от энергии фотонов $\hbar\omega$ под действием γ -облучения для чистых и ZnO:Ga пленок с различным содержанием примеси и различной толщиной на подложках из стекла. Дозы облучения: 7γ – 110.46 кГр; 8γ – 182.93 кГр; 9γ – 304.4 кГр и 10γ – 589.52 кГр. Цифрами 1–5 обозначены группы кривых для пленок до и после γ -облучения: 1 – ZnO, $d = 640$ нм, $E_g = 3.29$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.28$ эВ (9γ); 2 – ZnO, $d = 335$ нм, $E_g = 3.32$ эВ (as-

dep.) и $E_g = 3.29$ эВ (9 γ); 3 – ZnO:Ga (0.9 ат%), $d = 350$ нм, $E_g = 3.56$ эВ (as-dep.), $E_g = 3.54$ эВ (7 γ) и $E_g = 3.53$ эВ (10 γ); 4 – ZnO:Ga (0.9 ат%), $d = 950$ нм, $E_g = 3.52$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.52$ эВ (9 γ) и 5 – ZnO:Ga (6.6 ат%), $d = 565$ нм, $E_g = 3.98$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.98$ эВ (10 γ).

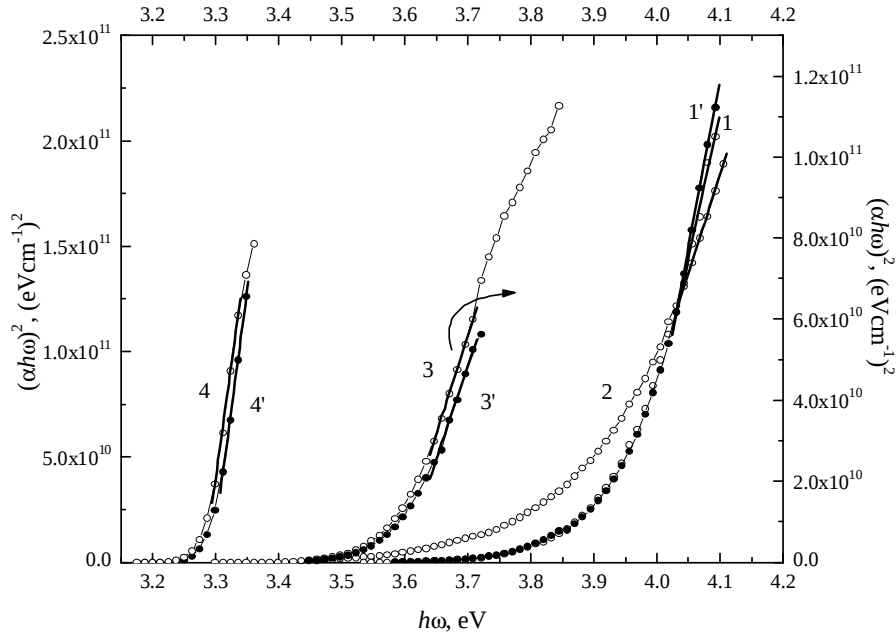
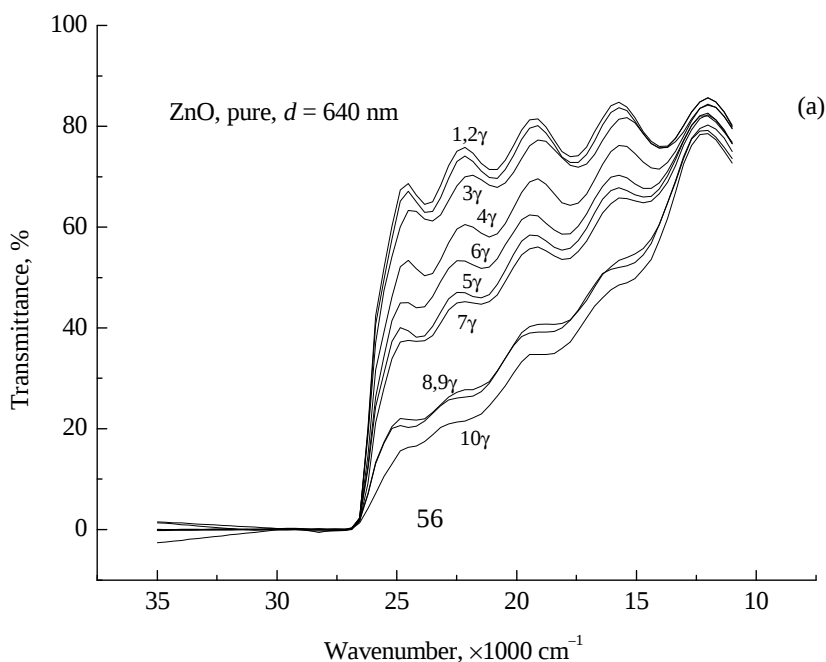


Рис.2. Зависимости $(\alpha h\omega)^2$ от энергии фотонов $h\omega$ под действием γ -облучения для чистых и ZnO:Ga пленок с различным содержанием примеси и различной толщиной на подложках из сапфира. Дозы облучения: 7 γ – 110.46 кГр; 8 γ – 182.93 кГр; 9 γ – 304.4 кГр and 10 γ – 589.52 кГр. 1 и 1' – ZnO:Ga (3.4 ат%), $d = 495$ нм, соответственно, $E_g = 3.95$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.96$ эВ (9–10 γ); 3 и 3' – ZnO:Ga (1.3 ат%), $d = 590$ нм, соответственно, $E_g = 3.59$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.60$ эВ (9–10 γ); 4 и 4' – ZnO, $d = 530$ нм, соответственно, $E_g = 3.28$ эВ (as-dep.) и $E_g = 3.29$ эВ (7–10 γ).

Здесь $\square$ – постоянная и E_0 – эмпирический параметр, обычно слабо зависящий от температуры и описывающий ширину локализованных состояний в запрещенной зоне, но не их энергетические позиции (он рассматривается как параметр, который включает эффекты от возможных дефектов [23]). Зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов $h\omega$ в полулогарифмическом масштабе используются для вычисления параметра E_0 . Значения E_0 для чистых и легированных пленок ZnO до облучения представлены в табл.1. Увеличение E_0 до 408 мэВ для пленок ZnO с 6.6 ат% на подложках из стекла и до 660 мэВ для пленок ZnO с 9.3 ат% Ga на подложках из сапфира предполагает, что структурная разупорядоченность пленок ZnO увеличивается в результате легирования галлием относительно нелегированных пленок и в зависимости от степени легирования.

Изменения величины E_0 вследствие облучения для легированных пленок на подложках из сапфира незначительны. Похожая ситуация имеет место и для легированных пленок на подложках из стекла. Только для чистых пленок ZnO, для которых величины E_0 относительно малы, уменьшение этого параметра с увеличением дозы облучения становится заметным. В этом случае можно говорить об улучшении стехиометрии чистых пленок ZnO. Величина E_0 для чистых пленок ZnO, полученных лазерным напылением на различных подложках, исследовалась в [23]. Непосредственно после выращивания пленки на сапфире имели величину $E_0 \sim 65$ мэВ, которая уменьшилась до 30 мэВ после отжига на воздухе, в то время как пленки на подложке из плавленого кварца, имевшие первоначально величину $E_0 \sim 150$ мэВ, после отжига имели $E_0 > 100$ мэВ. Большая величина E_0 для пленок на подложках из плавленого кварца приписывается большей плотности планарных дефектов.

Оптическое пропускание до и после γ -облучения как функция волновых чисел в области $35000\text{--}11000\text{ см}^{-1}$ ($\sim 280\text{--}900\text{ нм}$) показано на рис.3, соответственно, для чистых (а) и ZnO:Ga (b) пленок и стеклянной подложки (с), необлученных и облученных различными γ -дозами. Отношение пропускания пленки к пропусканию подложки $T_{\text{film}}/T_{\text{sub}}$ в видимой и ближней ИК области для всех исследуемых пленок остается неизменным после облучения (рис.4а). В спектрах пропускания наблюдаются интерференционные полосы, и эта интерференционная картина показывает, что поверхность пленок является однородной. В результате γ -облучения интерференционные полосы становятся частично плоскими. Спектры оптического пропускания образцов на подложках из сапфира до и после облучения имеют 80%–90% пропускания в видимой области и выше 90% в ближней ИК области и остаются неизменными после облучения. Для самой подложки имеет место вызванная облучением широкая полоса поглощения со множеством пиков, которая увеличивается с увеличением γ -дозы (рис.4b). Известно, что γ -облучение влияет на оптические свойства стеклянных материалов в зависимости от состава, а также присутствия дефектов в стекле [24].



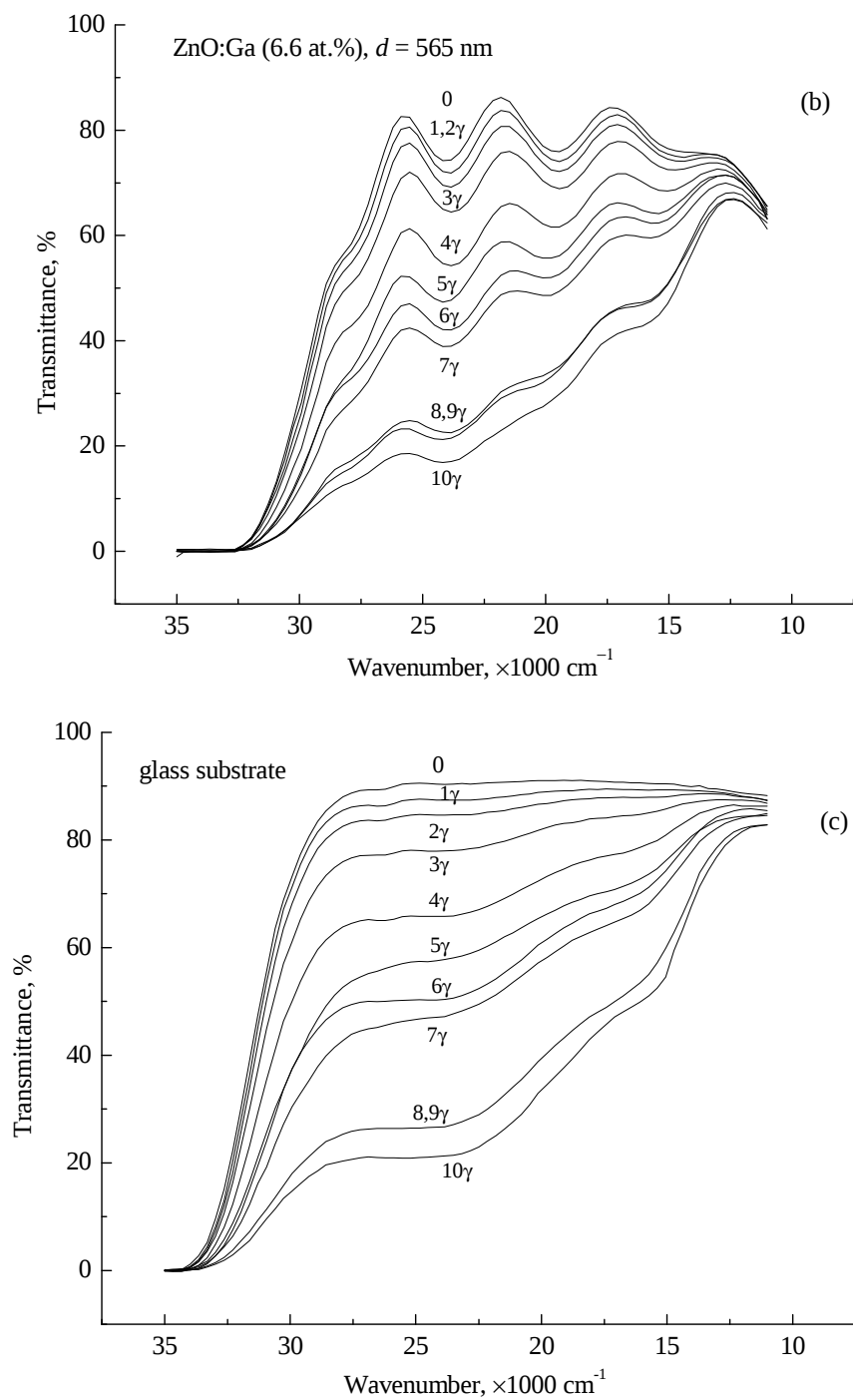


Рис.3. Спектры оптического пропускания чистой (а) и ZnO:Ga (6.6 ат%) (b) пленок на подложке из стекла, и подложки из стекла (с), необлученных и облученных различными γ -дозами: 0 – as-dep.; 1 γ – 0.84 кГр; 2 γ – 2.1 кГр; 3 γ – 4.62 кГр; 4 γ – 9.66 кГр; 5 γ – 19.74 кГр; 6 γ – 49.98 кГр; 7 γ – 110.46 кГр; 8 γ – 182.93 кГр; 9 γ – 304.4 кГр и 10 γ – 589.52 кГр.

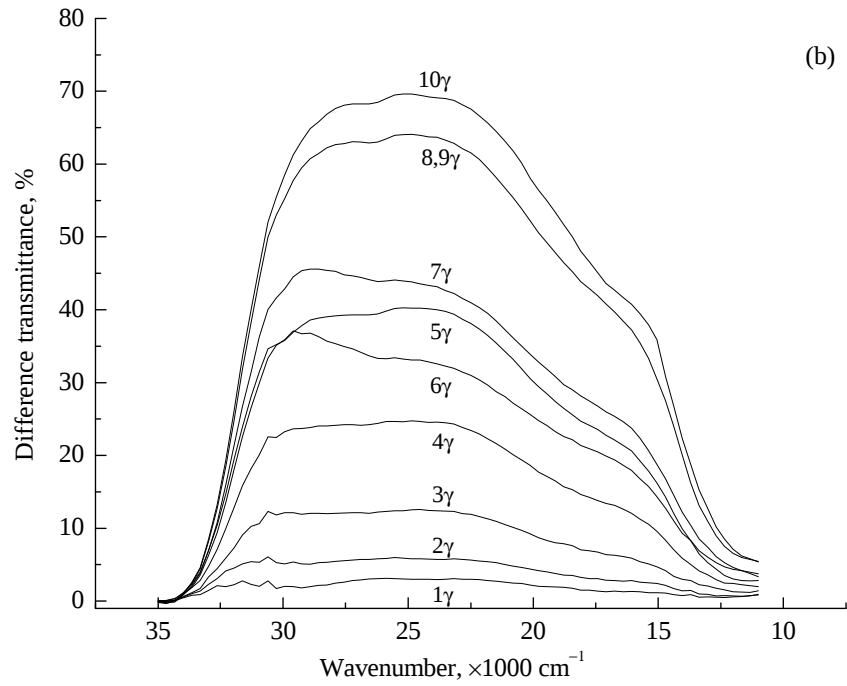
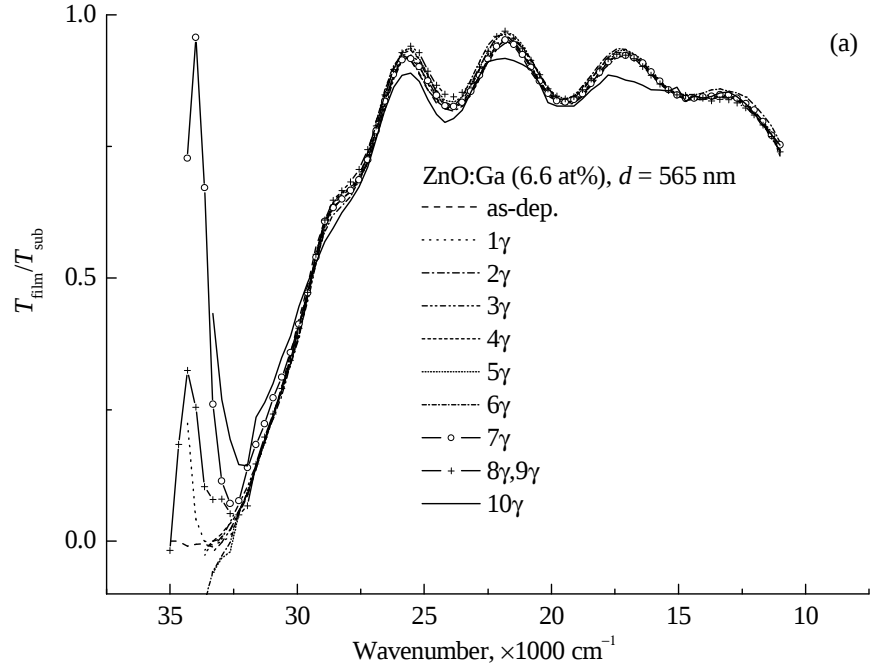


Рис.4. Отношение пропускания пленки ZnO:Ga (6.6 ат%) к пропусканию подложки из стекла $T_{\text{film}}/T_{\text{sub}}$ (a) и разница спектров пропускания облученной подложки из стекла относительно необлученной (b) для каждой γ -дозы: 0 – as-dep.; 1 γ – 0.84 кГр; 2 γ – 2.1 кГр; 3 γ – 4.62 кГр; 4 γ – 9.66 кГр; 5 γ – 19.74 кГр; 6 γ – 49.98 кГр; 7 γ – 110.46 кГр; 8 γ – 182.93 кГр; 9 γ – 304.4 кГр и 10 γ – 589.52 кГр.

Проводящие характеристики чистых пленок ZnO определяются в основном электронами, генерируемыми кислородными вакансиями V_O и междоузельным цинком Zn_i [25]. Удельное электрическое сопротивление пленок ZnO:Ga меньше относительно чистых пленок ZnO. Введение этой примеси может увеличить плотность свободных электронов при замещении атомов решетки (Zn) [26] и привести к уменьшению сопротивления. Измеренные значения поверхностного сопротивления R и толщины d пленок были использованы для определения удельного сопротивления ρ по формуле $\rho = Rd$. На рис.5 показано удельное сопротивление ρ необлученных и облученных чистых и легированных Ga пленок ZnO. Обнаружено, что удельное сопротивление уменьшается незначительно с увеличением γ -дозы и только на начальной стадии облучения. В [13] удельное сопротивление пленок ZnO, подвергнутых облучению пучками ионов Au с энергией 120 МэВ, уменьшается от 78 до 0.71 Ом см с увеличением плотности потока ионов. Предполагается, что причиной этого может быть создание кислородных вакансий V_O и междоузельного цинка Zn_i в ходе облучения быстрыми тяжелыми ионами. Исследование эффектов облучения монокристаллов ZnO, выращенных гидротермальным методом, электронами с энергией 1 МэВ показало увеличение удельного сопротивления от $\sim 10^2$ до $\sim 10^8$ Ом см, вероятно, из-за вакансий цинка (см. работу [3]).

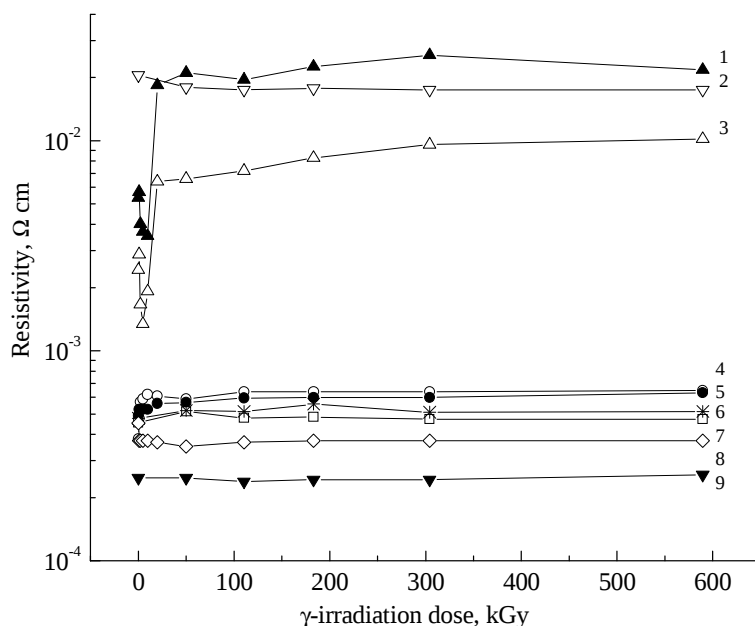


Рис.5. Электрическое удельное сопротивление чистых (1–3) и легированных Ga (4–9) пленок ZnO на подложках из стекла (1,3,4,5 и 8) и сапфира (2,6,7 и 9) до и после облучения различными γ -дозами. Концентрация Ga и толщина пленок, соответственно: 4 – 0.9 ат%, $d = 950$ нм; 5 – 0.9 ат%, $d = 350$ нм; 6 – 9.3 ат%, $d = 530$ нм;

7 – 1.3 ат%, $d = 590$ нм; 8 – 6.6 ат%, $d = 565$ нм; 9 – 3.4 ат%, $d = 495$ нм. Толщины чистых пленок ZnO: 1 – 335 нм, 2 – 530 нм и 3 – 640 нм.

Спектры инфракрасного отражения, измеренные в области 200–10000 см^{-1} , в зависимости от дозы γ -облучения для пленок ZnO:Ga (0.9 и 6.6 ат%) на подложках из стекла и ZnO:Ga (1.3, 3.4 и 9.3 ат%) на подложках из сапфира представлены на рис.6. Для сравнения здесь же представлены спектры чистых пленок ZnO. Спектры отражения не изменяются с увеличением дозы облучения до 110.46 кГр. Край отражения, соответствующий плазменной частоте ω_p , находится в области частот 6500–8900 см^{-1} , зависит от содержания примеси и возрастает с увеличением концентрации свободных носителей в ZnO. Однако, на рис.6 (кривые 1 и 2) можно заметить понижение наклона края отражения, обусловленного скоростью рассеяния свободных носителей, с понижением толщины пленки при одинаковой степени легирования (0.9 ат%), а также зависимость наклона от дозы облучения, что проявляется в изменении удельного сопротивления ZnO:Ga (0.9 ат%) с $d = 350$ нм от 7.5×10^{-4} для необлученной пленки до 13.4×10^{-4} Ом см для γ -дозы 110.46 кГр. Удельное сопротивление на нулевой частоте определялось из частотной зависимости функции диэлектрических потерь $\text{Im}\epsilon^{-1}$ с помощью соотношений Крамерса–Кронига по формуле $\rho_{Dr} = 4\pi/\tau\omega_p^2$ ($1/\tau$ – скорость рассеяния свободных носителей). Эти данные согласуются со значениями ρ , измеренными четырехзондовым методом.

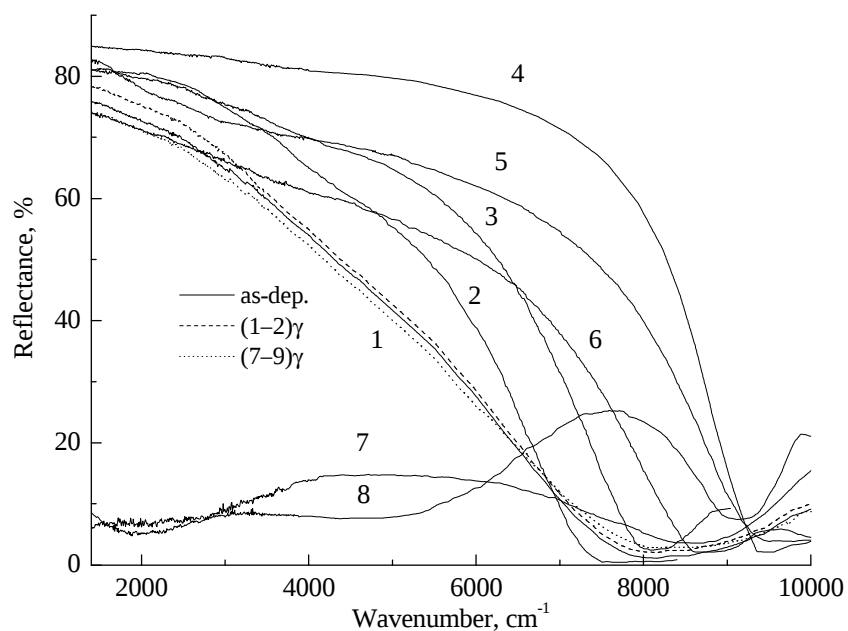


Рис.6. Спектры отражения в далекой ИК области для чистых и ZnO:Ga пленок на подложках из стекла (1,2,5,7 и 8) и сапфира (3,4 и

б). Группа кривых 1 показывает изменение наклона края отражения от γ -облучения для пленки ZnO:Ga (0.9 ат%), $d = 350$ нм при различных γ -дозах; 2 – ZnO:Ga (0.9 ат%), $d = 950$ нм; 3 – ZnO:Ga (1.3 ат%), $d = 590$ нм; 4 – ZnO:Ga (3.4 ат%), $d = 495$ нм; 5 – ZnO:Ga (6.6 ат%), $d = 565$ нм; 6 – ZnO:Ga (9.3 ат%), $d = 530$ нм; 7 и 8 – чистые пленки ZnO с $d = 340$ нм и $d = 640$ нм, соответственно.

4. Заключение

Прозрачные проводящие чистые и легированные Ga пленки ZnO, изготовленные методом вакуумного электронно-лучевого напыления, подвергались γ -облучению от источника излучения Co^{60} со средней энергией γ -фотонов 1.25 МэВ различными дозами вплоть до ~ 600 кГр. Влияние γ -облучения на пленки ZnO определялось с использованием рентгенодифракционного анализа, измерениями удельного сопротивления, оптического поглощения, отражения и пропускания. Спектры оптического пропускания облученных образцов на подложках из стекла имели вызванную облучением широкую полосу поглощения со множеством пиков, которая увеличивалась с возрастанием γ -дозы. Она приписывается радиационным дефектам в стекле. Спектры оптического пропускания необлученных и облученных образцов пленок на подложках из сапфира имели 80%–90% пропускания в видимом диапазоне и выше 90% в ближней ИК области и не изменялись от облучения. Удельное электрическое сопротивление изменялось незначительно с увеличением γ -дозы на начальной стадии облучения при малых дозах. Рентгенодифракционные измерения также показали, что ухудшения кристаллической структуры материалов на основе пленок ZnO под действием γ -облучения не происходит.

Таким образом, можно заключить, что под действием γ -облучения на исследуемые пленки ZnO при используемых здесь дозах не происходит ухудшения структурных, оптических и электрических характеристик, что делает возможным использование их в качестве радиационно-устойчивых прозрачных проводящих материалов.

Работа выполнена в рамках Государственного тематического финансирования (№ 91) Республики Армения и при частичной финансовой поддержке фонда ANSEF (№ PS-785 и № PS-1137).

ЛИТЕРАТУРА

1. T.Minami. Semicond. Sci. Technol., **20**, S35 (2005).
2. C.Klingshirn. Phys. Stat. Sol. (b), **244**, 3027 (2007).
3. Z.-Q.Fang, B.Claflin, D.C.Look, G.C.Farlow. J. Appl. Phys., **101**, 86106 (2007).
4. J.F.Cordaro, C.E.Shipway, J.T.Schitt. J. Appl. Phys., **61**, 429 (1987).
5. D.C.Look, D.C.Reynolds, J.W.Hemsky, et al. Appl. Phys. Lett., **75**, 811 (1999).
6. C.Tonon, C.Duvignacq, et al. J. Phys. D: Appl. Phys., **34**, 124 (2001).
7. F.Tuomisto, K.Saarinen, D.C.Look. Phys. Stat. Sol. (a), **201**, 2219 (2004).
8. C.Coskun, D.C.Look, et al. Semicond. Sci. Technol., **19**, 752 (2004).
9. F.Tuomisto, K.Saarinen, D.C.Look, G.C.Farlow. Phys. Rev. B., **72**, 85206 (2005).

10. A.Y.Polyakov, N.B.Smirnov, A.V.Govorkov, et al. J. Appl. Phys., **94**, 2895 (2003).
11. F.D.Auret, S.A.Goodman, M.Hayes, et al. Appl. Phys. Lett., **79**, 3074 (2001).
12. S.Kraft, B.Schattat, W.Bolse, et al. J. Appl. Phys., **91**, 1129 (2002).
13. P.M.Ratheesh Kumar, C.Sudha Kartha, et al. J. Appl. Phys., **97**, 013509 (2005).
14. A.Abu El-Fadl, E.M.El-Maghraby, G.A.Mohamad. Cryst. Res. Technol., **39**, 143 (2004).
15. V.V.Emtsev, Yu.A.Nikolaev, D.S.Poloskin, et al. Semiconductors, **39**, 1406 (2005).
16. B.Kh.Baïramov, I.V.Bodnar', V.V.Emtsev, et al. Semiconductors, **40**, 64 (2006).
17. D.C.Look. Materials Science and Engineering, **B 80**, 383 (2001).
18. N.R.Aghamalyan, E.A.Kafadaryan, R.K.Hovsepyan. Chapter in book "Trends in Semiconductor Science", ed. by T. Elliott. New York, Nova Science Publishers, 2005, pp. 81-110.
19. C.Manificier, J.Gasoit, J.P.Fillard. J. Phys. E (Sci. Instrum.), **9**, 1002 (1976).
20. K.Park, M.Canonico, G.K.Celler, et al. J. Appl. Phys., **102**, 074507 (2007).
21. E.Burstein. Phys. Rev., **93**, 632 (1954).
22. T.S.Moss. Proc. Phys. Soc. (London), **B 67**, 775 (1954).
23. V.Strikant, D.R.Clarke. J. Appl. Phys., **81**, 6357 (1997).
24. G.Sharma, K.S.Thind, et al. Phys. Stat. Sol. (a), **204**, 591 (2007).
25. F.A.Kreger. The Chemistry of Imperfect Crystals. Amsterdam, North-Holland, 1964.
26. J.Hu, R.G.Gordon. J. Appl. Phys., **72**, 5381 (1992).

γ -ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
 ԹԱՓԱՆՑԻԿ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ZnO:Ga ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ն.Ռ. ԱՂԱՄԱԼՅԱՆ, Ռ.Կ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ի.Ա. ՂԱՄԲԱՐՅԱՆ,
 Ե.Ա. ԿԱՖԱԴԱՐՅԱՆ, Ս.Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ռ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ա.Կ. ՇԻՐԻՆՅԱՆ

Վակուումում էլեկտրոնաճառագայթային գոլորշացման մեթոդով նստեցված ZnO և ZnO:Ga թափանցիկ և հաղորդիչ թաղանթները ճառագայթվել են սենյակային ջերմաստիճանում Co^{60} ճառագայթիչով՝ γ -ֆոտոնների միջին 1.25 ՄԷՎ էներգիայով տարբեր դոզաներով մինչև 600 կԳր: Որոշված են արգելված գոտու լայնությունը E_g , տեսակարար դիմադրությունը ու խտությունը, ինչպես նաև ZnO և ZnO:Ga թաղանթների կառուցվածքային գործակիցները կախված խառնուկի քանակից և γ -դոզայից:

γ -IRRADIATION EFFECT ON TRANSPARENT CONDUCTING ZnO:Ga FILMS

N.R. AGHAMALYAN, R.K. HOVSEPYAN, I.A. GAMBARYAN, E.A. KAFADARYAN,
 S.I. PETROSYAN, G.R. BADALYAN, A.K. SHIRINYAN

Transparent and conducting pure and Ga-doped ZnO films prepared by e -beam evaporation in vacuum were irradiated at room temperature by Co^{60} radiation source with γ -photon average energy of 1.25 MeV and with different doses up to ~600 kGy. Energy band gap E_g , electrical resistivity, carrier density as well as structure parameters of pure and doped ZnO films versus impurity content and γ -doses were determined in order to estimate the radiation-induced degradation effect on ZnO-based films used as transparent electrodes for electro-optical device applications.