

3. Poklonski, N.A. et al. // Chem. Phys. Lett. 2008. Vol. 464. P. 187–191.
4. Reich, S., Thomsen, C., Ordejon, P. // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. P. 195416.
5. Damjanovic, M. et al. // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. P. 2728–2739.
6. Jishi, R.A. et al. // Chem. Phys. Lett. 1993. Vol. 209. P. 77–82.
7. Деммель, Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения. М.: Мир. 2001. 430 с.
8. Kürti, J. et al. // New J. Phys. 2003. Vol. 5. P. 125.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO, ЛЕГИРОВАННЫХ Eu И Er, НА ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ

В. В. Малютина-Бронская¹, В. Б. Залесский¹,
Т. Р. Леонова¹, А. В. Мудрый²

¹ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАНБ», malyutina1@yahoo.com

²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Оксид цинка (ZnO) – один из перспективных широкозонных материалов, характеризующийся возможностью достижения высоких концентраций собственных дефектов, обеспечивающих возможность изменения оптических свойств, проводимости среды и интенсивности свечения в разных областях спектра. Таким образом, развитие технологии получения кристаллических пленочных p/n-ZnO-структур с варьируемой концентрацией собственных дефектов является актуальной задачей при разработке ряда интегрируемых твердотельных оптоэлектронных устройств с прогнозируемыми оптическими и проводящими свойствами.

ZnO привлекает пристальное внимание исследователей из-за своих уникальных свойств и возможностей разнообразных применений в электронике – в излучателях света в ультрафиолетовом диапазоне, пьезоэлектрических устройствах, химических сенсорах и спинтронике [1]. Пленки ZnO, легированные редкоземельными элементами, могут найти применение в оптоэлектронных системах, поскольку проявляют люминесцентные свойства в широком диапазоне длин волн [2, 3, 4].

Тонкие пленки ZnO:Eu и ZnO:Er на кремниевой подложке производились методом реактивного магнетронного распыления мишеней цинка с содержанием редкоземельных элементов в атмосфере аргона и кислорода, после чего подвергались термическому отжигу в температурном диапазоне 300–900 °С.

Морфология и шероховатость поверхности анализировались с помощью сканирующей электронной микроскопии (установка JEOL 6400). Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились с помощью ксеноновой лампы мощностью 1000 Вт в качестве источника возбуждения в комбинации с дифракционным монохроматором (600 линий / мм, фокусное расстояние ~ 0.3 м). Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на частотах 500 кГц и 1 МГц производились на измерителе иммитанса E7-20 при комнатной температуре при освещении лампой накаливания и без освещения.

Изображения сканирующей электронной микроскопии поперечного сечения ZnO:Er и ZnO:Eu показали, что различия в морфологии образцов связаны с формами и размерами зерен. Пленки ZnO:Er и ZnO:Eu содержат большие зерна, с размерами в области ~ 0.1–0.3 мкм, что сравнимо с толщиной пленки (рис. 1).

Для всех пленок ZnO, легированных Er³⁺, после термообработки в интервале

600–900 °С на спектрах ФЛ обнаружено желтое излучение. Замечено, что желтое свечение уменьшается с увеличением температуры отжига. Одной из причин этого наиболее вероятно является образование связей Er – V₀ в пленках ZnO:Er. Другая причина изменения интенсивности желтой полосы 1.94 эВ состоит в локализации примесных состояний Er при Er – O_i. Для всех пленок ZnO, легированных Eu³⁺, после термообработки в интервале 200–500 °С обнаружено интенсивное красное излучение, связанное с внутрицентровыми оптическими переходами ионов Eu³⁺. Этот результат указывает на то, что в процессе магнетронного напыления в решетку ZnO могут быть введены ионы в состоянии Eu³⁺.

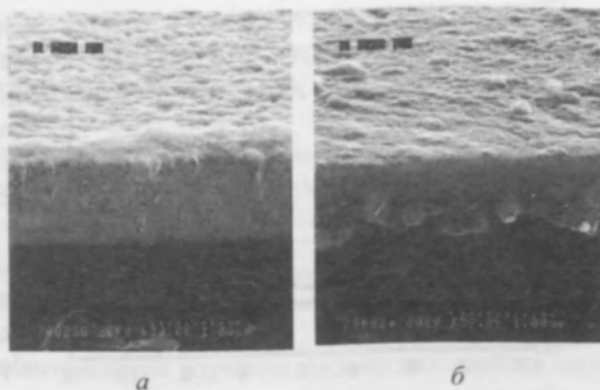


Рис. 1. Изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности образцов ZnO:Eu (а) ZnO:Er (б) и их поперечного сечения

На рисунке 2 представлены ВАХ структур ZnO:Eu /p-Si (см. рис. 2, а) и ZnO:Er /n-Si (рис. 2, б). При обеих полярностях наблюдается сублинейная зависимость. ВАХ структур ZnO:Eu /p-Si (рис. 2, а) при прямых напряжениях и структур ZnO:Er /n-Si при обратных напряжениях (рис. 2, б) проявляют фотоэлектрический эффект. Проводимые исследования выявили, что проводимость и фотопроводимость исследуемых структур определяются характеристиками получаемой пленки. В частности, влияют условия рекомбинации на поверхности и в объеме пленки ZnO, связанные с размерами и количеством зерен, получаемых в процессе распыления. Поскольку в основ-

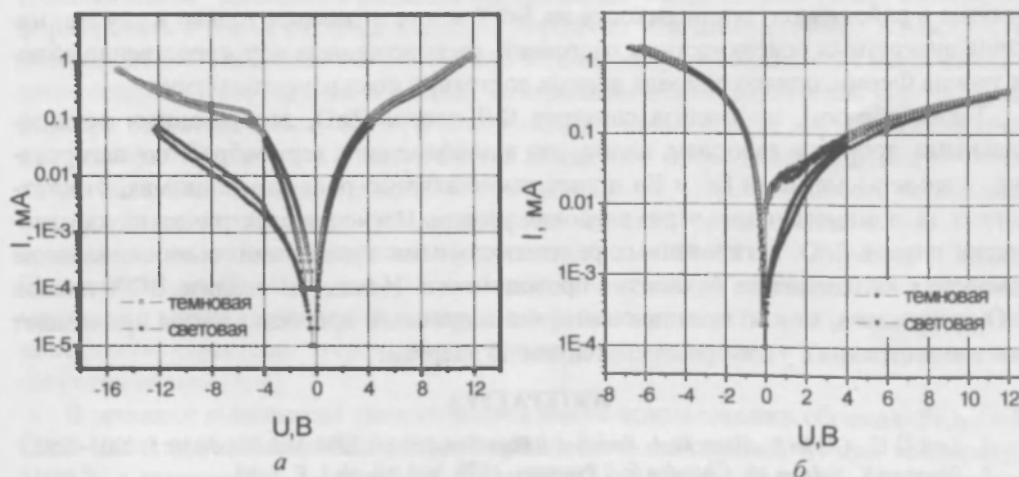


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структур ZnO:Eu /p-Si (а), отожженных при $T = 400$ °С и ZnO:Er /n-Si, отожженных при $T = 900$ °С (б)

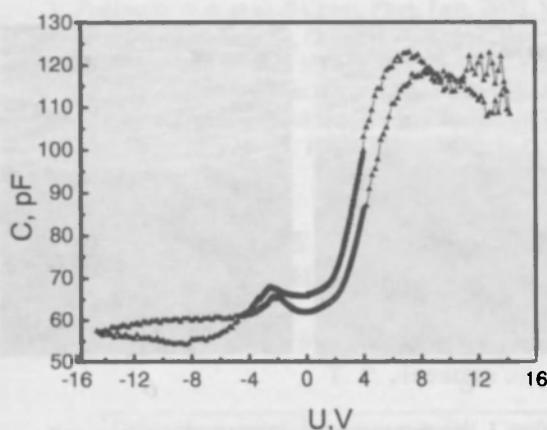


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика структур ZnO:Er/n-Si, отожженных при $T = 900$ °C, измеренная на частоте 1 МГц

ния их емкости соответствуют значениям на плато ВФХ. В нашем случае таким материалом выступает ZnO. На ВФХ исследуемых структур наблюдается уменьшение величины емкости на данных плато с ростом частоты. Также на ВФХ образцов ZnO:Er/Si и ZnO:Eu/Si после отжига при температурах 900 °C и 400 °C, соответственно, наблюдается максимум в области модуляции емкости. Интенсивность данного максимума уменьшается с увеличением частоты и увеличивается с увеличением освещенности для обеих частот, что свидетельствует о неоднородном распределении заряженных локальных центров с относительно узким распределением по энергии, которые могли быть образованы как в результате отжига, так и непосредственно в процессе получения пленок.

Теоретические расчеты зависимости емкости от напряжения показали, что максимумы в районе модуляции емкости на ВФХ могут появиться только в случае наличия дискретных поверхностных состояний, расположенных непосредственно вблизи уровня Ферми, однако природа данных состояний пока не установлена.

Таким образом, из анализа спектров ФЛ пленок ZnO, легированных редкоземельными эрбием и европием, видно, что в дополнение к термообработке легирование пленок элементами Er и Eu играет также важную роль в механизмах, ответственных за люминесценцию через глубокие уровни. Изучение электрических характеристик пленок ZnO, легированных редкоземельными элементами, выявило влияние освещения на изменение механизма проводимости. Исходя из анализа ВФХ пленок ZnO на кремнии, можно предположить, что в процессе протекания тока принимают участие состояния с узким распределением по энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Look D. C., Claflin B., Alivov Ya I., Park S. J. // Phys. Stat. Sol. (a). 2004. Vol. 301. № 10. P. 2203–2212.
2. Bhushan S., Saleem M., Chandra S. // Pramana. 1978. Vol. 10. № 1. P. 1–10.
3. Zhang X. T., Liu Y. C. et al // Thin solid films. 2002. Vol. 413. P. 257–261.
4. Ishizumi A., Taguchi Y., Yamamoto A., Kanemitsu Y. // Thin solid films. 2005. Vol. 486. P. 50–52.

ном пленки ZnO имеют собственную электронную проводимость, то можно заметить, что большая величина фотопроводимости обусловлена усилением фототока $p-n$ -перехода (см. рис. 2, а).

ВФХ регистрировались в прямом и обратном направлении в широком диапазоне частот 100 кГц – 1 МГц. На рис. 3 представлена ВФХ типичного образца ZnO:Er/n-Si. ВФХ исследуемых структур представляют собой кривые, характерные для высокочастотных ВФХ классических МДП-структур. В исследуемой гетероструктуре роль диэлектрика играют наиболее высокоомные материалы, а значе-