

07:09

Особенности люминесценции гетероструктур ZnO : Te/GaN/Al₂O₃

© А.М. Багамадова, А.Ш. Асваров, А.К. Омаев, М.Е. Зобов

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, Махачкала, Россия

E-mail: m_asyabag@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2018 г.

Методом газофазной эпитаксии в водороде в проточном реакторе пониженного давления получены качественные гетероэпитаксиальные структуры (0001)ZnO:Te/(0001)GaN/(0001)Al₂O₃. Проведен рентгеноструктурный анализ указанных гетероструктур, который показал высокое структурное совершенство тонких слоев оксида цинка. Также изучена морфология поверхности и проведен анализ особенностей ультрафиолетовой фотолюминесценции гетероструктуры ZnO/GaN/Al₂O₃.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47030.17446

Оксид цинка — широкозонный полупроводник с кристаллической решеткой типа вюрцита. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составляет 3.37 eV. Сочетание таких свойств, как прозрачность и высокая электропроводность, позволяет применять тонкопленочные структуры на основе ZnO в качестве газовых сенсоров, солнечных батарей, пьезоэлектрических устройств и др. Благодаря высокой энергии связи свободных экситонов (60 meV) оксид цинка перспективен для использования в коротковолновой оптоэлектронике в качестве полупроводниковых диодов. Сообщалось также о том, что удалось получить стимулированную экситонную люминесценцию на объемных кристаллах и эпитаксиальных пленках при температурах от 77 до 550 K [1–5].

Большинство активных приборов микроэлектроники содержит в своем составе гомо- и гетероструктуры. В гетероструктурах реализуется контакт двух полупроводников, которые различаются структурными и электрофизическими параметрами: кристаллической решеткой, шириной запрещенной зоны, эффективной массой и т.п. Вследствие этого их экспериментальное исследование и теоретическое описание связаны со значительными сложностями. При несоответствии решеток

Угловое расположение 2θ , интегральная ширина B , межплоскостное расстояние d_{004} рефлексов (0004) эпитаксиального слоя ZnO и буферного слоя GaN

Рефлекс	2θ , deg	B , deg	d_{004} , Å
(0004)ZnO	72.66	0.0895	1.30020
(0004)GaN	72.90	0.0835	1.29668

гетероструктур менее 1% (как в случае ZnO и GaN) происходит их гетероэпитаксиальное сопряжение, в результате чего приповерхностные состояния на межфазной границе не возникают, а перенос заряда через границу может хорошо описываться моделью Андерсона. Поскольку физико-химические свойства пленок оксида цинка в значительной степени зависят от технологии получения и легирования, в настоящей работе поставлена задача синтеза высокосвершенных гетероэпитаксиальных слоев ZnO, легированного теллуром, на ориентирующих подложках (0001)Al₂O₃ с буферным подслоем GaN методом химических транспортных реакций в проточном реакторе пониженного давления (ПРПД) в потоке водорода и исследования фотолюминесцентных свойств синтезированной гетероструктуры.

Сапфировые подложки базисной ориентации с нанесенными на них тонкими пленками (0001)GaN, используемые в качестве подслоев, погружались в ПРПД для последующего осаждения тонких пленок оксида цинка, легированных Te [6,7]. Гетероэпитаксиальные структуры (0001)ZnO:Te/(0001)GaN/(0001)Al₂O₃ были получены в потоке водорода ($v = 11/h$) при температурах подложки 620–650°C. Как показали эксперименты, для получения прозрачных и качественных слоев ZnO:Te концентрация теллура не должна превышать 1%. Поверхность полученных образцов исследовалась с помощью сканирующего микроскопа Leo-1450. Люминесцентные свойства гетероэпитаксиальных слоев ZnO:Te были изучены с помощью азотного лазера ЛГИ-21 с длиной волны $\lambda = 337$ nm на модернизированном спектрально-вычислительном комплексе КСВУ-23 [8] в диапазоне температур 77–300 К. Обратная линейная дисперсия установки 1.3 nm/mm.

При исследовании морфологии поверхности слоев ZnO:Te (рис. 1) установлено, что она состоит из правильных сглаженных шестигранников примерно одного размера, типичных для базисной ориентации

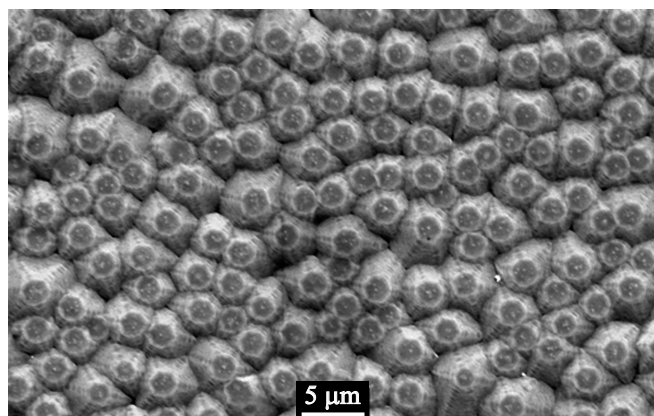


Рис. 1. Микрофотография поверхности гетероструктуры (0001)ZnO:Te/GaN/Al₂O₃.

оксида цинка. На рис. 2 представлена дифрактограмма гетероструктуры ZnO:Te/GaN/Al₂O₃, характерная для ориентации (0001), пики от других ориентаций на ней отсутствуют. Следует отметить, что пики (0002) ZnO и GaN на дифрактограммах не разрешились из-за близости параметров кристаллических структур этих материалов. На вставке *a* к рис. 2 показан рефлекс от Te-содержащей фазы с $2\theta = 25.29^\circ$, который можно отнести к кубической фазе (111) ZnTe_xO_{1-x} с постоянной решетки $a = 0.6085$ nm. На вставке *b* представлен набор рефлексов в области углов $2\theta = 72-73.5^\circ$. Левый рефлекс соответствует (0004)ZnO для длин возбуждения $\lambda = K_{\alpha 1}$, рефлекс посередине образован путем наложения рефлекса (0004)ZnO с $\lambda = K_{\alpha 2}$ и рефлекса (0004)GaN от буферного слоя GaN при $\lambda = K_{\alpha 1}$. Правый рефлекс соответствует (0004)GaN при $\lambda = K_{\alpha 2}$. При этом интегральная ширина *B* рефлекса (0004)ZnO почти равна интегральной ширине рефлекса от (0004)GaN, что свидетельствует о высоком структурном совершенстве слоя. Из таблицы видно, что постоянная решетки $c = 4d_{004} = 0.52008$ nm для фазы ZnO:Te, т.е. немного меньше табличного значения для объемного оксида цинка ($c_0 = 0.52066$ nm согласно JCPDS N 00-036-1451).

На рис. 3, *a* приведен спектр ультрафиолетовой фотолюминесценции (УФЛ) гетероструктуры ZnO:Te/GaN/Al₂O₃, полученный при 77 K,

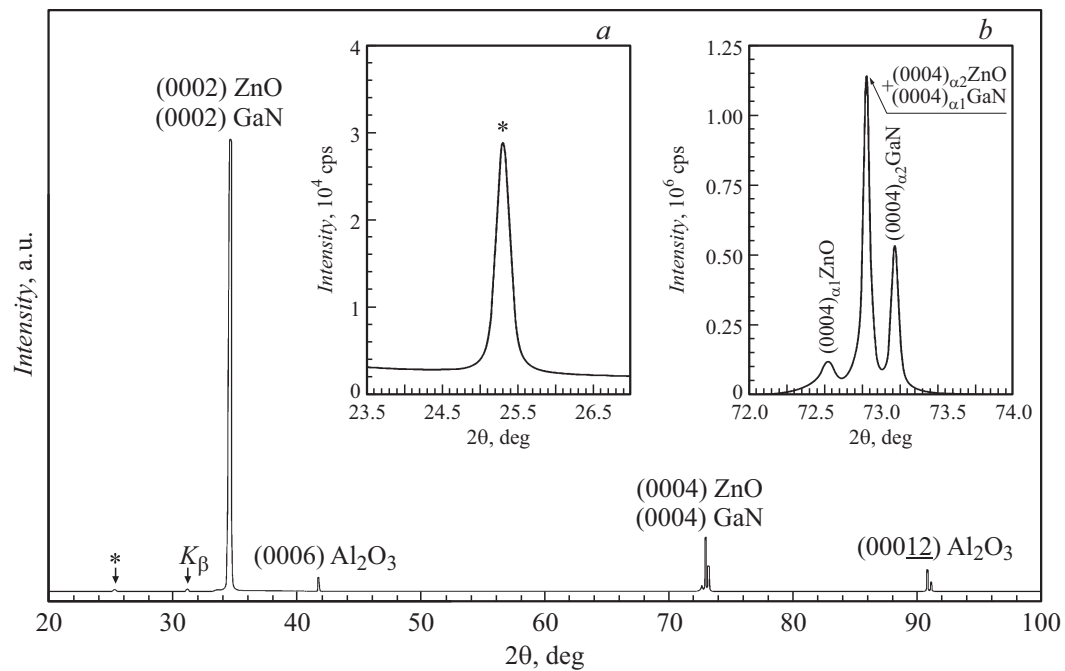


Рис. 2. Дифрактограмма гетероструктуры ZnO:Te/GaN/Al₂O₃. Звездочкой показан рефлекс от Te-содержащей фазы.

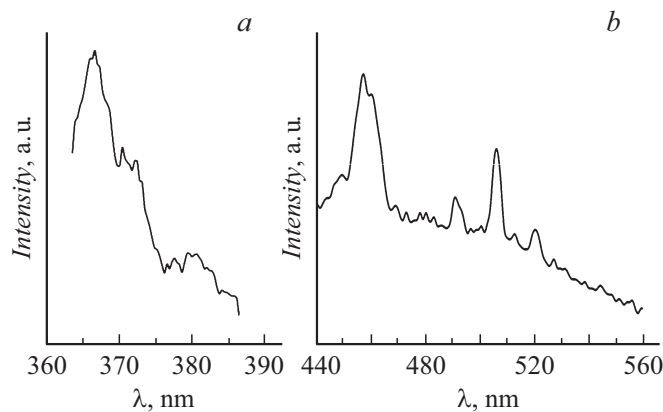


Рис. 3. Спектры ультрафиолетовой люминесценции при 77 К (*a*) и видимой фотолуминесценции при 300 К (*b*) для гетероструктуры ZnO:Te/GaN/Al₂O₃.

который существенно отличается от спектра УФЛ для нелегированных слоев ZnO/GaN/Al₂O₃ наличием линий экситона, связанного на нейтральных акцепторах. Также в легированном Te гетеропереходе наблюдается уменьшение интенсивности линии A1 (свободного экситона) по сравнению с нелегированными образцами, что связано с искажениями кристаллической решетки ZnO и образованием фазы ZnTe_xO_{1-x} [8–12]. Обнаруживаются полосы излучения с максимумами на длинах волн 366.01, 366.69, 370.76, 372.46, 377.89, 379.9 nm. Из литературы известно, что пики с $\lambda = 366.01$ и 366.69 nm обусловлены излучением свободных B1- и A1-экситонов соответственно. Наличие люминесценции B1-экситона связано с высоким структурным совершенством полученных образцов [10,11]. Из спектра УФЛ (рис. 3, *a*) видно, что линия свободного экситона A1 смещена в коротковолновую область на 6 Å. В данном спектре линии с длиной волны $\lambda = 370.76$ и 372.46 nm мы приписываем появлению мелких нейтральных акцепторных уровней с энергией 0.16 и 0.25 eV [6]. Также на спектре УФЛ наблюдается появление пиков $\lambda = 377.89$ и 379.9 nm. Смещение пика A1 и появление дополнительных пиков мы связываем с легированием пленок оксида цинка теллуром и образованием дополнительной фазы ZnTe_xO_{1-x}.

Особый интерес представляет видимая часть люминесценции слоев ZnO:Te при $T = 300$ К. Дефектная полоса с максимумом $\lambda = 505\text{--}515$ nm, обычно наблюдаемая в слоях оксида цинка при 300 К [7], в нашем спектре фотолюминесценции от гетероструктуры ZnO:Te/GaN/Al₂O₃ (рис. 3, b) при комнатной температуре разрешилась на отдельные узкие линии: достаточно интенсивную голубую линию с $\lambda = 458$ nm и линии с длинами волн 490, 505 и 520 nm, принадлежащие зеленой части спектра ZnO.

Таким образом, нами получены гетероструктуры (0001)ZnO:Te/(0001)GaN/(0001)Al₂O₃ с высоким структурным совершенством, что подтверждается рентгеновскими исследованиями. Морфология поверхности гетероструктур однородна и типична для базисной ориентации пленок оксида цинка. Исследования УФЛ синтезированной гетероструктуры при комнатной температуре обнаружили появление дополнительного пика в голубой области спектра на длине волны $\lambda = 458$ nm. Показано, что гетероструктуры на основе оксида цинка, легированные теллуром, можно использовать как эффективные светоизлучающие устройства в голубой и ближней ультрафиолетовой области спектра.

Работа выполнена с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ДНЦ РАН в рамках госзадания № АААА-А-17-117021310364-1 и частичной поддержке РФФИ (№ 16-07-00503, 18-29-12099).

Список литературы

- [1] *Bagnall D.V., Chen Y.F., Shen M.Y., Zhu Z., Goto T., Yao T.* // J. Cryst. Growth. 1998. V. 184–185. P. 605–609.
- [2] *Tang Z.K., Wong G.K.L., Yu P., Kawasaki M., Ohtomo A., Koinuma H., Segawa Y.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 3270–3272.
- [3] *Klingshirn C.* // Adv. Mater. Opt. Electron. 1994. V. 3. P. 103–109.
- [4] *Hvam J.M.* // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. P. 4459–4464.
- [5] *Грузинцев А.Н., Волков В.Е., Дубонос С.В., Князев М.А., Якимов Е.Е.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 12. С. 1473–1476.
- [6] *Ataev B.M., Lundin W.V., Mamedov V.V., Bagamadova A.M., Zavarin E.E.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. V. 13. P. L211–L214.
- [7] *Абдуев А.Х., Атаев Б.М., Багамадова А.М.* // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1987. Т. 23. В. 11. С. 1928–1930.

- [8] Багамадова А.М., Зобов Е.М., Омаев А.К. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 5. С. 78–81.
- [9] Абдуев А.Х., Адуков А.Д., Атаев Б.М., Рабаданов Р.А., Чайхов Д.А. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 50. В. 6. С. 1137–1141.
- [10] Абдуев А.Х., Адуков А.Д., Атаев Б.М., Рабаданов Р.А. // ФТГ. 1980. Т. 22. В. 11. С. 3471–3473.
- [11] Бутхузи Т.В., Георгобиани А.Н., Зада-Улы Е., Эльтазаров Б.Т., Хулардава Т.Г. // Тр. ФИАН. 1987. Т. 182. С. 140–187.
- [12] Атаев Б.М., Камиллов И.К., Лундин В.В., Мамедов В.В., Омаев А.К., Шахшаев Ш.-М.О. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 30–35.