

06

Люминесцентные свойства эпитаксиальных слоев и гетероструктур на основе GaN, выращенных на подложках пористого SiC

© К.Д. Мынбаев, М.Г. Мынбаева, А.С. Зубрилов, Н.В. Середова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: mynkad@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 июля 2006 г.

Проведены сравнительные измерения фотолюминесценции одиночных эпитаксиальных слоев GaN и электролюминесценции двойных гетероструктур GaN/AlGaN, выращенных на подложках пористого (ПКК) и непористого карбида кремния. Показано, что в эпитаксиальных слоях, выращенных на пористой подложке, уменьшается концентрация центров безызлучательной рекомбинации, связанных с дислокациями. Сделано предположение, что это, в свою очередь, влияет на процессы излучательной рекомбинации в приборных структурах на основе эпитаксиальных слоев нитридов III группы, выращенных на подложке ПКК.

PACS: 78.55.-m

Несмотря на значительный прогресс в технологии выращивания нитридных соединений, они по-прежнему содержат значительное количество структурных дефектов. Ранее было показано, что улучшение структурных свойств эпитаксиальных слоев нитридов III группы может быть достигнуто при использовании пористых подложек [1–5]. В настоящей работе сообщается о результатах сравнительного исследования фотолюминесценции (ФЛ) одиночных эпитаксиальных слоев (ОЭС) GaN, выращенных на подложках пористого (ПКК) и непористого карбида кремния. В работе также представлено первое сообщение об электролюминесценции (ЭЛ) светодиодных гетероструктур на основе эпитаксиальных слоев нитридов III группы, выращенных на подложках ПКК.

Подложки ПКК были получены поверхностной анодизацией пластин 6H-SiC [6]. Анодизации подвергалась половина каждой пластины, вторая половина использовалась в качестве „контрольной“. Выращивание слоев проводилось хлорид-гидридным методом (ХГМ) непосредственно на подложке SiC и ПКК, без использования эпитаксиальных буферных слоев [7].

Были проведены сравнительные измерения низкотемпературной ФЛ на серии из 10 ОЭС GaN толщиной $1\ \mu\text{m}$, выращенных на подложках ПКК и непористого SiC. В спектрах ФЛ всех исследованных образцов присутствовали: краевая полоса экситонной люминесценции (с максимумом при $3.44\ \text{eV}$), полоса донорно-акцепторной люминесценции (с максимумом при $3.24\ \text{eV}$) и ее фоновые повторения, а также полосы „голубой“ и „желтой“ люминесценции [8]. Отличительной особенностью спектров ФЛ ОЭС, выращенных на подложках ПКК, было существенное увеличение интенсивности всех полос люминесценции. Этот эффект мы наблюдали в двух независимо проведенных сериях измерений при возбуждении сигнала ФЛ лазером N_2 с длиной волны $337\ \text{nm}$ и лазером HeCd с длиной волны $325\ \text{nm}$. Типичные спектры ФЛ ОЭС, выращенных на пористой и непористой подложках, представлены на рис. 1. Для наглядности спектры представлены в полулогарифмическом масштабе. На рисунке видно существенное увеличение интенсивности ФЛ слоя, выращенного на подложке ПКК. Максимальное наблюдавшееся нами увеличение интенсивности дефектно-примесной ФЛ ОЭС, выращенных на ПКК, составило один порядок. Интегральная интенсивность пика экситонной люминесценции в слоях, выращенных на пористых подложках, также возрастала, однако несколько слабее, чем интенсивность полос дефектно-примесной ФЛ (см. рис. 1). Полуширина экситонной линии ФЛ ЭС, выращенного на ПКК, составила при $80\ \text{K}$ $41\ \text{meV}$, а выращенного на SiC — $45\ \text{meV}$.

Светодиодные структуры представляли собой двойные гетероструктуры (ДГС) GaN/AlGaN, в которых для создания p -области было применено легирование GaN магнием, а n -области — кремнием [9]. Активная n -GaN:Si область была также легирована Zn для получения интенсивной голубой люминесценции. На рис. 2 представлены спектры ЭЛ ДГС, выращенных на подложке ПКК, снятые при различных токах инжекции. Спектры были измерены при пропускании через структуру импульсного тока при комнатной температуре. Основная полоса в представленных спектрах ЭЛ связана с донорно-акцепторной

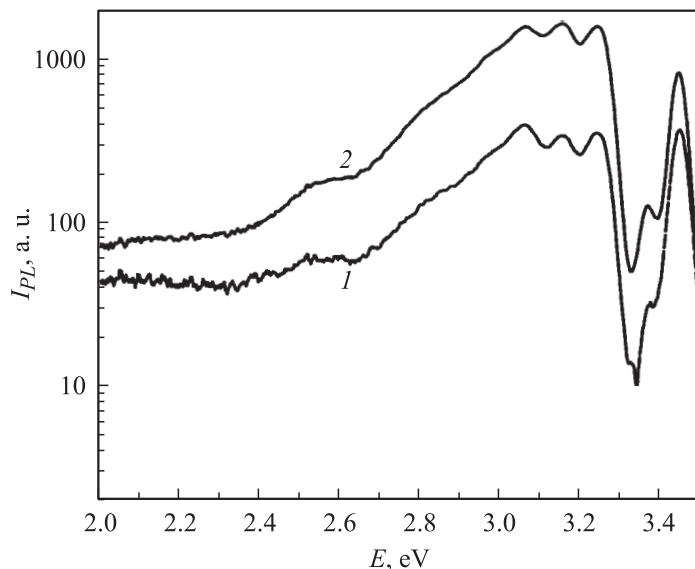


Рис. 1. Спектры ФЛ одиночных слоев GaN, выращенных на подложках непористого SiC (кривая 1) и ПКК (кривая 2). Спектры были сняты при 80 К при возбуждении на длине волны 337 nm.

рекомбинацией [9]; ее полуширина составляла около 0.5 eV. Как видно, в исследуемой структуре наблюдался значительный сдвиг максимума сигнала ЭЛ в зависимости от величины тока возбуждения. Сдвиг максимума ЭЛ в светодиодных структурах на основе нитридов III группы, и в том числе двойных гетероструктурах, обычно приписывается наличию в запрещенной зоне материала активной области нескольких примесных уровней с различными энергиями ионизации [9–11]. Отличительной особенностью данной структуры оказалась рекордная величина сдвига, составившая ~ 0.6 eV при изменении тока от 5 до 350 mA, а также тот факт, что при всех использованных токах инжекции в спектре ЭЛ доминировала одна и та же полоса (для сравнения см., например, [11,12]). Мы предполагаем, что в нашем случае большая величина наблюдаемого сдвига может объясняться расширением энергетического спектра уровней, дающих вклад в излучательную рекомбинацию. Отметим, что

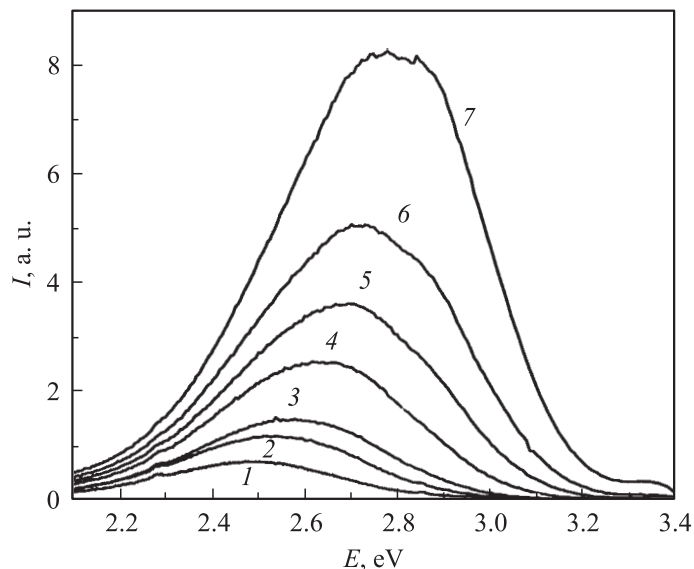


Рис. 2. Спектры ЭЛ ДГС GaN/AlGaN, выращенной на подложке ПКК. Ток накачки, mA: 1 — 80, 2 — 120, 3 — 140, 4 — 200, 5 — 250, 6 — 300, 7 — 350.

этот эффект был характерным только для структур, выращенных на подложке ПКК. Сдвиг максимума ЭЛ ДГС, выращенной в аналогичных условиях на подложке непористого SiC, составил всего ~ 20 meV при изменении тока возбуждения от 10 до 100 mA.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы о люминесцентных свойствах эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на подложках ПКК. Данные ФЛ ОЭС указывают на то, что основной причиной увеличения интенсивности люминесценции в них было уменьшение концентрации центров безызлучательной рекомбинации. Проведенные ранее исследования образцов данной серии методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали существенное (на два порядка) снижение плотности проникающих дислокаций в ОЭС, выращенных на подложке ПКК. Этот эффект был объяснен спецификой релаксации напряжений несоответствия в гетеросистеме, содержащей „податливый“ пористый слой [4]. Основываясь на данных ПЭМ, а также

на современных представлениях о негативном влиянии дислокаций на процессы излучательной рекомбинации в GaN [13,14], можно сделать вывод, что центры безызлучательной рекомбинации в исследуемых образцах были связаны с дислокациями.

Полученные в настоящей работе данные ФЛ ОЭС и ЭЛ ДГС, свидетельствующие о возгорании в слоях, выращенных на ПКК, дефектно-примесной люминесценции, также могут быть объяснены уменьшением плотности дислокаций. Известно, что в гетероэпитаксиальных слоях GaN с низкой и высокой плотностью дислокаций дефекты и примеси проявляют разную электрическую активность, что связано с их тенденцией к сегрегации на дислокациях [15]. Аналогичным образом можно предположить, что в слоях, выращенных на непористом SiC, точечные дефекты и примеси частично связаны на дислокациях и дают меньший вклад в люминесценцию, а в слоях, выращенных на ПКК, концентрация оптически активных дефектов и примесей увеличивается.

В совокупности данные ПЭМ, ФЛ и ЭЛ указывают на то, что снижение плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях, выращенных с использованием пористой подложки, улучшает оптические свойства этих слоев. Отметим, что большая величина сдвига максимума ЭЛ ДГС, выращенных на ПКК, при доминировании в спектре одной полосы открывает для этих структур перспективу применения в светодиодах, перестраиваемых по длине волны излучения.

Авторы выражают благодарность О.В. Ледаеву и Д.В. Цветкову за проведение процессов эпитаксии, а также С. Остапенко и И. Тарасову (University of South Florida) за измерения ФЛ.

Работа была поддержана грантом NICOP N 00014-01-1-0828.

Список литературы

- [1] Yun F., Reshchikov M.A., He L., Morkoç H., Inoki C.K., Kuan T.S. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 4142.
- [2] Inoki C.K., Kuan T.S., Sagar A., Lee C.D., Feenstra R.M., Koleske D.D., Diaz D.J., Bohn P.W., Adesida I. // Phys. Stat. Sol. (a). 2003. V. 200. P. 44.
- [3] Jeong J.K., Kim H.J., Seo H.-C. et al. // Electrochem. Sol.-State Lett. 2004. V. 7. P. C43.
- [4] Мынбаева М.Г., Константинов О.В., Мынбаев К.Д., Романов А.Е., Ситникова А.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 23. С. 25–31.

- [5] Yun F., Doğan S., Moon Y.T., Fu Y., Xu J., Johnstone D., Morkoç H. // Phys. Stat. Sol. (c). 2005. V. 2. P. 2087.
- [6] Мынбаева М.Г., Бауман Д.А., Мынбаев К.Д. // ФТТ. 2005. Т. 47. С. 1571.
- [7] Nikolaev A.E., Nikitina I., Zubrilov A., Mynbaeva M., Melnik Yu., Dmitriev V. // MRS Int. Journ. Nitride Semicond. Res. 2000. V. 5S1. P. W6.
- [8] Reshchikov M.A. // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. Art. 061301.
- [9] Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diode. Berlin: Springer, 1997. P. 177.
- [10] Пухтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. М.: Высш. шк., 1994. 304 с.
- [11] Eliseev P.G., Perlin P., Furioli J., Sartori P., Mu J., Osinski M. // J. Electron. Mater. 1997. V. 26. P. 311.
- [12] Casey H.C., Jr., Muth J., Krishnankutty S., Zavada J.M. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2867.
- [13] Karpov S.Yu., Makarov Yu.N. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 4721.
- [14] Yonenaga I., Makino H., Itoh S., Goto T. // J. Electron. Mater. 2006. V. 35. P. 714.
- [15] Fang Z.-Q., Look D.C., Polenta L. // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. V. 14. P. 13061.