

Особенности получения и некоторые свойства гетероперехода $n\text{-ZnO} : \text{Ga}/p\text{-GaN} : \text{Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

© Б.М. Атаев[†], Я.И. Ализов*, В.В. Мамедов, С.Ш. Махмудов, Б.А. Магомедов

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,
367003 Махачкала, Россия

* Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 13 октября 2003 г. Принята к печати 5 ноября 2003 г.)

Приведены первые результаты по выращиванию гетероэпитаксиальных структур $\text{ZnO}/\text{GaN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в проточном реакторе пониженного давления методом химических транспортных реакций с использованием плазмы высокочастотного разряда. Активация реагентов в процессе роста позволила значительно повысить эффективное давление атомарного кислорода в реакторе и существенно снизить температуру эпитаксии, улучшить морфологические, структурные параметры слоев ZnO и сформировать гетеропереход $n\text{-ZnO} : \text{Ga}/p\text{-GaN} : \text{Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Оксид цинка и нитрид галлия — материалы со структурой вюрцита, близкие по параметрам решетки и другим физическим свойствам (см., например, [1]). В то же время оксид цинка обладает рядом таких существенных преимуществ, как интенсивная экситонная люминесценция при высоких температурах [2], обусловленная большой энергией связи экситонов (~ 61 мэВ), и устойчивость к высокоэнергетическому излучению [3], что является одним из требований, предъявляемых к материалам, предназначенным для работы в экстремальных условиях.

Одним из общепризнанных методов получения эпитаксиальных слоев (ЭС) ZnO является метод химических транспортных реакций (ХТР) в различных модификациях. Общий недостаток этой технологии — относительно высокая температура в области подложки ($580\text{--}680^\circ\text{C}$), стимулирующая побочные реакции и, как следствие, появление неконтролируемой примеси в составе ЭС. Известно, что недостаток кислорода в ZnO приводит к возникновению собственных дефектов донорного типа (межузельный цинк и вакансии кислорода). Известно также, что использование радикалов (атомов) кислорода позволяет создать максимальное из возможных эффективное давление кислорода над растущей пленкой (т.е. повысить более чем на 6 порядков — см., например, [4]) и сместить соотношение элементов в сторону избытка кислорода, уменьшив тем самым концентрацию собственных дефектов. Ранее на практике этот подход использовался только при процедурах отжига монокристаллов и ЭС оксидов для получения стехиометрического состава [5].

В данной работе мы впервые сообщаем о разработке низкотемпературного варианта метода ХТР, об осаждении ЭС ZnO , стимулированном плазмой высокочастотного (ВЧ) разряда, и о формировании гетероперехода $n\text{-ZnO} : \text{Ga}/p\text{-GaN} : \text{Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Проточный реактор пониженного давления (ПРПД), описанный в [6], модифицирован ВЧ разрядом вдоль оси кварцевого реактора, причем разряд охватывает обе температурные зоны — как источника, так и подложки (рис. 1). При этом характерное рабочее давление H_2 в реакторе $\lesssim 1$ Торр, скорости потоков реагентов $1\text{--}3$ м · с⁻¹. Следует отметить, что активация реагентов в плазме ВЧ разряда позволила значительно уменьшить температуру эпитаксиального роста в системе $\text{ZnO}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (не менее чем на 200°C) и нижний предел температуры выращивания ЭС составил $T \approx 420^\circ\text{C}$ (рис. 1, *b*, кривая 2), а скорость роста v уменьшилась в ~ 4 раза (рис. 1, *b*), что существенно, особенно на начальной стадии эпитаксии, для управляемого зарождения и роста слоев ZnO . Был достигнут высокий уровень морфологических характеристик, структурных параметров и электрических характеристик за счет как уменьшения толщины переходного слоя, так и снижения содержания неконтролируемой примеси.

Изучение морфологии поверхности слоев $(11\bar{2}0)\text{ZnO}/(10\bar{1}2)\text{Al}_2\text{O}_3$ с помощью микроскопа LEICA DM LP с увеличением 600 показало, что ЭС, полученные в режимах с использованием активации процесса роста ВЧ разрядом, обладают менее развитой поверхностью — размеры фигур роста различаются более чем на порядок. Следует также отметить значительное уменьшение размеров и количества кластеров цинка, которыми завершаются фигуры роста на поверхности ЭС при обычном термическом выращивании, и как результат — формируется более гладкая зеркальная поверхность.

На рис. 2 представлены результаты рентгенодифракционных исследований слоев ZnO , полученные на дифрактометре ДРОН-2 с использованием CuK_α -излучения. Дифрактограмма соответствует ЭС $(11\bar{2}0)\text{ZnO}/(10\bar{1}2)\text{Al}_2\text{O}_3$ высокого совершенства. На вставке вверху приведены кривые качания вокруг пика $(22\bar{4}0)$ для слоя, полученного при чисто термическом выращивании (кривая 1), и для слоя, полученного при

[†] E-mail: crystal@dinet.ru

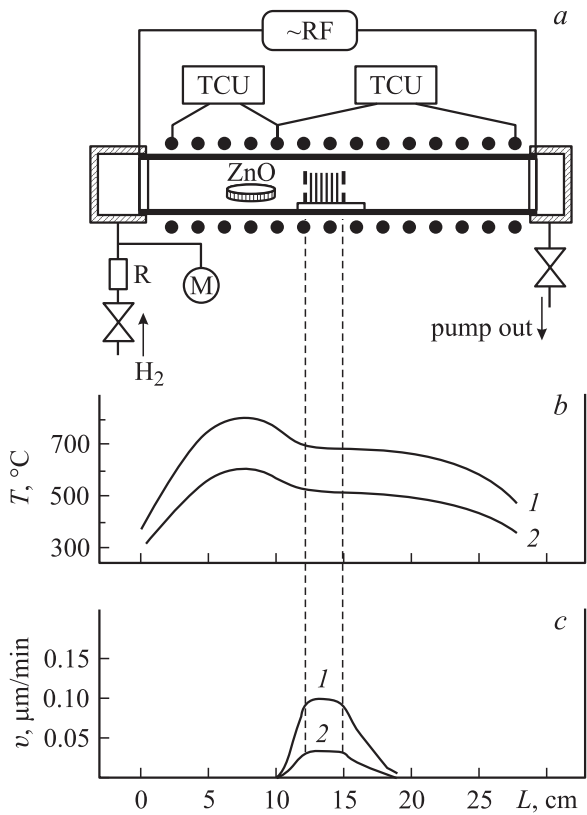


Рис. 1. Модификация газотранспортной установки с использованием ВЧ разряда: *a* — кварцевый реактор; *b* — распределение температуры T по длине реактора L ; *c* — распределение скорости роста слоев v в зоне осаждения. 1 — термическое выращивание, 2 — выращивание с ВЧ разрядом. TCU — регулятор температуры, М — манометр, R — регулятор расхода газа, RF — ВЧ генератор.

активации процесса роста ВЧ разрядом (кривая 2). Во втором случае можно видеть примерно двукратное уменьшение ширины пика, достигающей в оптимальных условиях значений менее 0.4° . Было также установлено, что при использовании технологии получения тонких (~ 15 нм) буферных слоев ZnO методом магнетронного распыления, включающим механизм автоэпитаксии, и данной методики достигается ширина пика ZnO менее 0.25° .

Хотя к настоящему времени выращивание ЭС ZnO на тонких слоях GaN описано в ряде работ, во всех случаях использовались слои n -GaN в качестве буферных в связи с близкими значениями постоянных решеток, и в литературе нет сообщений о формировании гетероперехода n -ZnO/ p -GaN. В наших экспериментах в качестве подложек p -типа проводимости использовались слои p -GaN:Mg толщиной ~ 1 мкм, выращенные на сапфировых подложках ориентации (0001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Для сравнительных исследований в тех же технологических условиях на сапфире выращивались структуры n -ZnO/ n -GaN с целью формирования n - n -гетероперехода. После осаждения

часть слоя ZnO:Ga стравливалась в 10%-м растворе HNO_3 и на поверхности ZnO:Ga и GaN:Mg наносились омические контакты из индия и золота соответственно. В слоях GaN:Mg концентрация и подвижность дырок, измеренные четырехзондовым методом, составляли соответственно $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В слоях ZnO:Ga толщиной ~ 2 мкм, полученных в ПРПД, концентрация и подвижность электронов составляли $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $40 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. На рис. 3 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) гетероперехода n -ZnO/ p -GaN. Можно видеть, что гетеропереход обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой, является выпрямляющим, в то время как ВАХ гетероперехода n -ZnO/ n -GaN линейна.

Изучено спектральное распределение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) структуры, наблюдаемой при прямом смещении. Спектр ЭЛ, полученный при прямом токе 3 мА и температуре 300 К (рис. 4), состоит из широкой полосы излучения с максимумом при 430 нм (2.88 эВ) и шириной на полувысоте 0.21 эВ. Как видно из

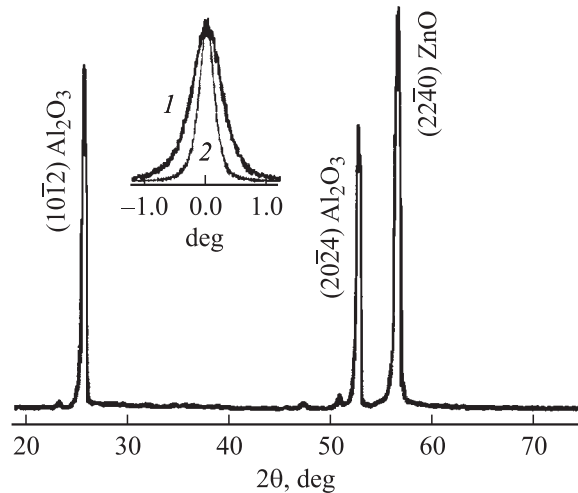


Рис. 2. Дифрактограмма структуры $(11\bar{2}0)\text{ZnO}/(10\bar{1}2)\text{Al}_2\text{O}_3$, полученной при выращивании ZnO с активацией ВЧ разрядом. На вставке — кривые качания вокруг пика $(22\bar{4}0)$: 1 — слой ZnO, полученный при термическом выращивании, 2 — слой, полученный с активацией ВЧ разрядом.

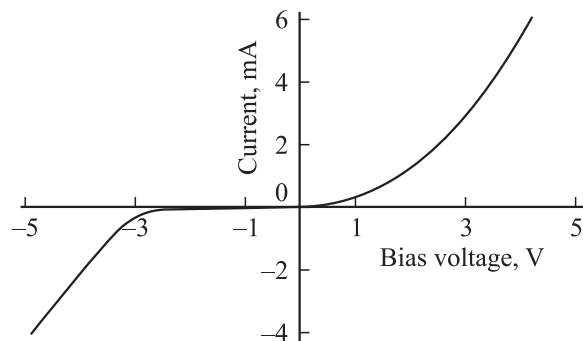


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика гетероструктуры n -ZnO:Ga/ p -GaN:Mg на подложке α - Al_2O_3 .

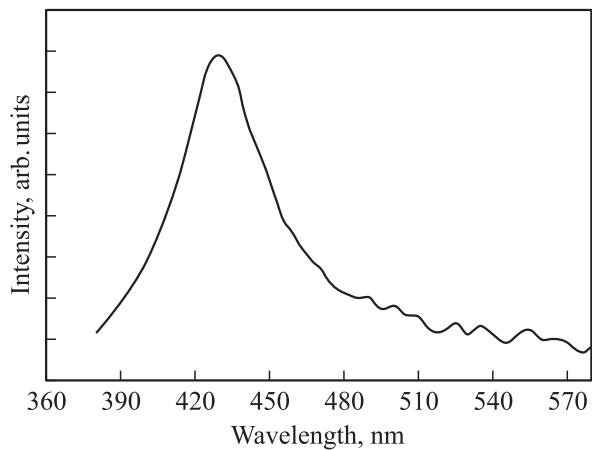


Рис. 4. Спектр электролюминесценции гетероструктуры $n\text{-ZnO:Ga}/p\text{-GaN:Mg}$ на подложке $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

рис. 4, пик 430 нм, расположенный в фиолетовой части спектра, имеет крыло, тянущееся в длинноволновую сторону. Наши данные находятся в согласии с результатами предыдущих работ, которые показывают, что полоса 430 нм возникает, когда инжекция происходит из n -области в легированную Mg p -область GaN [7,8]. Сравнение спектров ЭЛ и спектров катодолюминесценции слоев ZnO и GaN, полученных при приблизительно одинаковой плотности избыточных носителей, также показывает, что свойства гетероперехода определяются инжекцией электронов из $n\text{-ZnO}$ в $p\text{-GaN}$. Таким образом, инжекционные свойства гетероструктуры $n\text{-ZnO}/p\text{-GaN}$ определяются в основном инжекцией электронов из $n\text{-ZnO}$ в $p\text{-GaN}$, где и происходит рекомбинация. Вероятность реализации такого механизма возрастает при условии, что концентрация доноров в ZnO:Ga превышает концентрацию акцепторов в GaN:Mg (в нашем случае превышает почти на порядок). Отсутствие коротковолнового экситонного излучения в спектрах ЭЛ может быть также связано с эффектом самопоглощения при 300 К.

Следует особо отметить, что другой особенностью модифицированного метода ХТР в варианте ПРПД с активацией процессов роста ВЧ разрядом является возможность достижения таких уровней легирования и активации примеси, в том числе и акцепторного типа, которые недостижимы в обычных вариантах ХТР. Наши предварительные опыты по активации процессов получения и легирования в атмосфере H_2 , N_2 при одновременном легировании донорной и акцепторной примесями (ZnO:Ga в атмосфере $\text{H}_2:\text{N}_2=2:1$) показали принципиальную возможность получения ЭС ZnO p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\sim 10^4$ Ом·см. Получение ЭС $p\text{-ZnO}$ с высокой проводимостью, по-видимому, также реально и является нашей ближайшей задачей.

Таким образом, в работе показана возможность получения совершенных слоев оксида цинка модифи-

цированным методом ХТР в ПРПД с использованием плазмы ВЧ разряда. Активация реагентов в процессе роста позволила значительно повысить эффективное давление атомарного кислорода над растущим слоем и существенно снизить температуру эпитаксии (на $\geq 200^\circ\text{C}$), улучшить морфологические характеристики поверхности и структуру ЭС ZnO. Данным методом сформированы гетероэпитаксиальные структуры $n\text{-ZnO:Ga}/p\text{-GaN:Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, изучены их основные электрофизические и излучательные характеристики.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 01-02-16200, № 02-02-17627).

Список литературы

- [1] Б.М. Атаев, И.К. Камилов, В.В. Лундин, В.В. Мамедов, А.К. Омаев. Письма ЖТФ, **27** (2), 30 (2001).
- [2] А.Х. Абдуев, А.Д. Адуков, Б.М. Атаев. Опт. и спектр., **50** (6), 1137 (1981).
- [3] D.C. Look, D.C. Reynolds, J.W. Hemsky. Appl. Phys. Lett., **75**, 811 (1999).
- [4] А.Н. Георгобиани, А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, М.О. Воробьев. ФТП, **36** (3), 284 (2002).
- [5] А.Н. Георгобиани, М.В. Котляревский. Неорг. матер., **33**, 185 (1997).
- [6] А.Х. Абдуев, Б.М. Атаев, А.М. Багамадова. Неорг. матер., **23**, 1928 (1987).
- [7] S. Nakamura, S. Mukai, M. Senon. Jap. J. Appl. Phys., Pt 2, **30**, L1998 (1991).
- [8] J. Molnar, R. Singh, T.D. Moustakas. Appl. Phys. Lett., **66**, 268 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Obtaining and properties of a $n\text{-ZnO:Ga}/p\text{-GaN:Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ heterojunction

B.M. Ataev, Ya.I. Alivov, V.V. Mamedov, S.Sh. Makhmudov, B.A. Magomedov*

Institute of Physics,
DagSC of Russian Academy of Sciences,
Makhachkala, Russia

* Institute of Microelectronics Technology,
Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka, Russia

Abstract It is first reported about the growth of $\text{ZnO}/\text{GaN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ heterostructures in a low-pressure CVD system that is stimulated by a RF-discharge plasma. The RF-activation allowed us to substantially increase the effective pressure of the atomic oxygen, to decrease the growth temperature (more than by 200°C), to improve the crystallinity and stoichiometry, and eventually to fabricate the $p\text{-n}$ heterojunction in a $n\text{-ZnO:Ga}/p\text{-GaN:Mg}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ heterostructure.