

06;07

## СВЕТОДИОДЫ ИЗ НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ГОЛУБЫМ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© А.Г.Дрижук, М.В.Зайцев, В.Г.Сидоров, Д.В.Сидоров

Многочисленные попытки создания  $p$ - $n$ -перехода на GaN увенчались успехом [1,2] лишь спустя 20 лет после изготовления его первых эпитаксиальных слоев [3]. Это событие вызвало в научном мире новую волну интереса к GaN как материалу, пригодному для изготовления светодиодов и лазеров для сине-фиолетового диапазона. Слои GaN  $p$ -типа были получены разложением металлоорганики при легировании Mg [1]. Обработка слоя пучком электронов низкой энергии снижала его сопротивление и одновременно увеличивала эффективность синей люминесценции. Это несомненный успех, однако столь неравновесные условия получения слоев GaN с проводимостью  $p$ -типа могут быть причиной быстрой деградации излучающих  $p$ - $n$ -GaN-структур. В связи с этим разработка светодиодов на основе  $M$ - $i$ - $n$ -GaN-структур ( $i$ -слой — высокоомный GaN, обычно легированный Zn) сохраняет свою актуальность. Более того, такие светодиоды приобретают уникальные свойства, если их активную  $i$ -область легировать, например, Zn и O одновременно.

Излучающие  $M$ - $i$ - $n$ -структуры из GaN выращивались газофазовым методом в хлоридно-гидридной системе с использованием в качестве газа-носителя гелия (99.999%) [4]. Подложками служили пластины сапфира, ориентированные в плоскости  $(10\bar{1}2)$  с отклонением  $< 3^\circ$ . Слой нелегированного  $n$ -GaN выращивался при температуре подложек  $\sim 1050^\circ\text{C}$  при средней скорости роста  $\sim 20$  мкм/ч, что обеспечивало слою достаточно хорошее структурное совершенство и высокую проводимость при концентрации и подвижности электронов  $(6-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $60-110 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Толщина слоев  $n$ -GaN составляла 10-30 мкм. Выращивание  $i$ -слоя осуществлялось в том же процессе, но при более низкой температуре и скорости роста. Слой легировался одновременно цинком и кислородом. Конструкция реактора и режимы процесса обеспечивали взаимодействие Zn и O в зоне подложек и встраивание в решетку GaN не только свободного Zn, но и связанных пар Zn-O. С ростом концентрации кислорода удельное сопротивление  $i$ -GaN (Zn,O)-слоев

уменьшалось по сравнению с удельным сопротивлением  $i$ -GaN(Zn)-слоев, легированных до тех же концентраций Zn. Растворимость Zn в GaN в присутствии кислорода увеличивалась до 8–10% и составляла  $(10^{20}–10^{21})\text{см}^{-3}$ , причем только  $\sim 10\%$  из этого количества Zn находилось в электрически активном состоянии. Распределения Zn и O по слою достаточно хорошо повторяли друг друга. Эти факты указывают на то, что растворение Zn в GaN может происходить в виде оксида ZnO. Однако одинаковая кристаллическая структура ZnO и GaN с близкими параметрами решеток и близость ширины их запрещенных зон существенно затрудняют идентификацию включений ZnO в GaN как отдельной фазы. На образование связанных пар Zn–O прямо указывает полоса остаточных лучей ( $\lambda = 20–40\text{ мкм}$ ) в спектрах ИК-отражения GaN(Zn,O), близкая к полосе остаточных лучей ZnO (рис. 1). В спектрах люминесценции слоев GaN(Zn,O) наблюдалась ранее неизвестная полоса с максимумом  $h\nu_m \sim 2.55\text{ эВ}$  при 300 К и полушириной  $\Delta h\nu \sim 0.3\text{ эВ}$ , имеющая линейную поляризацию до 60%. Это самая узкая из всех известных примесных полос люминесценции в GaN. Давная полоса никогда не наблюдалась в GaN(Zn), а в GaN(Zn,O) может быть связана с дефектами, включающими пары Zn–O.

На поверхности  $i$ -GaN(Zn,O)-слоя в том же процессе выращивался  $i$ -GaN(Zn)-слой, легированный только Zn. Выращенные  $i$ - $n$ -GaN-структуры были ориентированы в плоскости (11 $\bar{2}$ 0). Рентгеновские измерения показали, что ось  $C$  в сапфире лежит с осью  $C$  в GaN-слое в одной плоскости,

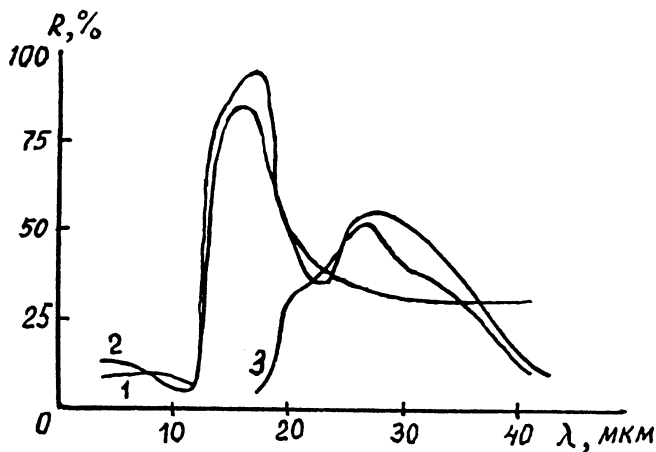


Рис. 1. Спектры ИК-отражения: 1 — GaN(Zn,O); 2 —  $n$ -GaN; 3 — ZnO.

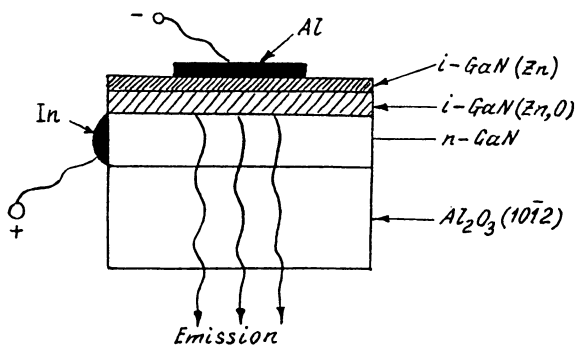


Рис. 2. Излучающая M-i-n-GaN (Zn,O)-структура.

перпендикулярной поверхности образца, а угол между осями составляет  $17^\circ$ .

Путем послыоного измерения удельного сопротивления  $\rho$  и спектров фотолуминесценции, а также с помощью рентгеновского микроанализа на содержание примесей установлено следующее типичное распределение  $\rho$ , Zn и O в *i*-слое выращенных структур. Поверхностный слой толщиной (0.05–0.5) мкм легирован только Zn и имеет  $\rho = (10^5 - 10^7) \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в зависимости от концентрации Zn. Основная часть *i*-слоя, составляющая (0.7–0.9) от его общей толщины и прилегающая к нелегированному слою *n*-GaN, легирована Zn и O и имеет  $\rho = (10^3 - 10^5) \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в зависимости от режимов роста. При таком соотношении толщин и удельных сопротивлений слоев большая часть приложенного к структуре напряжения падает на слое GaN (Zn). При напряжениях (4–40) В это соответствует полям  $(10^5 - 10^6) \text{ В/см}$ , хотя среднее поле во всей *i*-области не превышает  $(1-5) \times 10^4 \text{ В/см}$ . В таких полях возможно ускорение электронов в *i*-GaN (Zn)-слое до энергий, достаточных для возбуждения Zn-O-центров, находящихся в следующем *i*-GaN (Zn,O)-слое. Причем это возможно лишь при одной полярности напряжения на структуре — “минус” на контакте к *i*-GaN (Zn)-слою. Действительно, полоса поляризованной электролюминесценции (ЭЛ), связанная с Zn-O-центрами, наблюдалась только при этой полярности. При обратной полярности и более высоком напряжении на структуре наблюдалась слабая ЭЛ, в спектрах которой присутствовали полосы, характерные только для GaN (Zn).

Из выращенных структур изготовлены светодиоды (рис. 2). В качестве омических контактов к *n*-GaN использовались индий, серебро или никель. К *i*-слою контакты изго-

тавливались напылением алюминия в вакууме. В структурах с максимальной эффективностью ЭЛ концентрация Zn и среднее удельное сопротивление  $i$ -слоя имели значения  $N_{Zn} \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $\rho = (1-3) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . При этом обычно наблюдалась только одна поляризованная полоса. Степень поляризации ЭЛ при 300 К составляла 50–60%, не изменялась в пределах полосы излучения и не зависела от величины напряжения, приложенного к структуре. С ростом температуры в интервале 4.2–300 К степень поляризации увеличивалась на 5–15%, а при более высоких температурах уменьшалась и при 600 К практически исчезала. Азимут поляризации излучения, выходящего через подложку, всегда был перпендикулярен оси  $C$  сапфира. Это исключает влияние двулучепреломляющих свойств сапфира на излучение. С уменьшением температуры максимум ЭЛ всегда смещался в коротковолновую сторону с большей скоростью, чем возрастала ширина запрещенной зоны GaN, а полуширина полосы при этом всегда увеличивалась, что указывает на нефононную природу уширения. Сравнение полученных результатов с известными из литературы показало, что с поляризованной полосой в спектрах ЭЛ  $M-i-n\text{-GaN}(\text{Zn},\text{O})$ -структур нельзя сопоставить ни одну из известных полос люминесценции для GaN, легированного различными примесями [5].

Малая полуширина этой полосы, ее высокая степень поляризации, а также независимость поляризационных характеристик фотолюминесценции от поляризации возбуждающего межзонного света указывают на внутрицентральной механизм люминесценции.

Параметры светодиодов имели следующие типичные значения при 300 К и отрицательной полярности постоянного напряжения на контакте к  $i$ -слою структуры: рабочее напряжение 4–40 В, световая мощность 5–50 мкВт, яркость 400–600 кд/м<sup>2</sup>, быстродействие 20–100 нс, поляризация излучения  $\sim 60\%$ . Коэффициент полезного действия достигал 0.1–0.3%, что сравнимо с эффективностью  $p-n$ -переходов. Работоспособность светодиодов сохранялась при 4.2–900 К. Необратимое изменение параметров не превышало 10% в течение более 10 тыс. ч испытания в рабочих режимах. Достигнутые параметры позволяют использовать светодиоды в качестве голубых индикаторов, опорных источников цвета в метрологии и астронавигации, источников в поляризационных приборах, имеющих электронную регистрацию оптических сигналов.

Работа выполнена при частичной поддержке Аризонского Университета (США).

## Список литературы

- [1] *Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaci J.* // Japan. J. Appl. Phys. 2. Lett. V. 28. N 12. P. L2112 (December, 1989).
- [2] *Akasaki J., Amano H., Kito M., Hiramatsu K.* // J. Lumin. (Netherlands). V. 48-49. Pt. 2. P. 666. (Jan.-Feb., 1991) (Intern. Conf. on Lumin. -ICL-90. Lisbon, Portugal, 16-20 July, 1990).
- [3] *Maruska H.P., Tietjen J.J.* // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. N 10. P. 327.
- [4] *Андреев В.М., Оплеснин В.Л., Виданов А.П., Вигдорович Е.П., Хренов В.Т.* // Тез. докл. V Междунар. симп. по процессам роста и синтеза полупр. кристаллов пленок. Новосибирск, 1978. С. 50.
- [5] *Четверикова И.Ф., Чукичев М.В., Храмцов А.П.* // ЦНИИ "Электроника". Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы: 1982. № 8 (911). Ч. 1. 59 с.; 1983. № 1 (945). Ч. 2. 44 с.

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

Поступило в Редакцию  
18 января 1996 г.