ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 57, № 4 ФИЗИКА 2014

УДК 621.315.592:621.383

И.С. РОМАНОВ, И.А. ПРУДАЕВ*, А.А. МАРМАЛЮК**, В.А. КУРЕШОВ**, Д.Р. САБИТОВ**, А.В. МАЗАЛОВ***

ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИИ МАГНИЯ В АКТИВНУЮ ОБЛАСТЬ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN НА ВНУТРЕННЮЮ КВАНТОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ[1]

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости внутренней квантовой эффективности светодиодных структур синего диапазона длин волн с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN от температуры роста слоя *p*-GaN. Обсуждается влияние диффузии магния на фотолюминесцентные характеристики исследованных светодиодных структур.

Ключевые слова: *нитрид галлия, магний, диффузия, внутренняя квантовая эффективность, светодиод.*

При эпитаксии гетероструктур на основе нитридов III–N для формирования слоев *p*-типа проводимости чаще всего используется акцепторная примесь магния Mg. В светодиодных структурах эмиттерный слой *p*-GaN обычно выращивается сразу после активной области на основе квантовых ям InGaN/GaN, в связи с этим технологические параметры роста слоя GaN:Mg (температура и время роста, поток источника магния и др.) оказывают влияние на качество активной области и характеристики всей светодиодной структуры. Основным негативным воздействием режимов роста *p*-GaN на активную область светодиодной структуры с квантовыми ямами InGaN/GaN является эффект диффузии Mg. При попадании в область квантовых ям Mg образует глубокие акцепторные состояния [1]. Для изучения профиля распределения и концентрации атомов Mg по толщине светодиодной структуры используют метод вторично-ионной масс-спектроскопии (см., например, [1]). Недостатками данного метода являются разрушающий характер исследования и его трудоемкость. Также для определения влияния концентрации атомов Mg в активной области на характеристики светодиода необходимо проводить дополнительные исследования его люминесцентных характеристик. В данной работе проведены исследования влияния диффузии атомов Mg на фотолюминесцентные характеристики светодиодных структур с квантовыми ямами InGaN/GaN.

Исследовались светодиодные структуры с квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Рост структур проводился на планарных сапфировых подложках с ориентацией (0001). В качестве источников элементов III группы использованы металлорганические реагенты: триметилиндий $In(CH_3)_3$, триметилгаллий $Ga(CH_3)_3$ и триэтилгаллий $Ga(C_2H_5)_3$, а в качестве элементов V группы – аммиак NH_3. В качестве легирующих примесей для получения материала *p*-типа проводимости использовался бисциклопентодиенил магния $Mg(C_5H_5)_2$, а для получения материала *n*-типа проводимости – моносилан SiH_4. Светодиодные структуры состояли из низкотемпературного зародышевого слоя, буферного слоя *i*-GaN толщиной 2 мкм, слоя *n*-GaN толщиной 2 мкм, активной области из пяти квантовых ям InGaN толщиной 2.5–3 нм (содержание In в твердом растворе 12–16 %) и барьерных слоев GaN толщиной 10 нм, слоя *p*-GaN толщиной 140 нм. Исследованные образцы выращивались в идентичных условиях, за исключением температуры роста слоя *p*-GaN, которая изменялась для разных образцов в диапазоне 940–1060 °C. При этом время роста, поток источника магния, давление в реакторе и другие технологические параметры были фиксированы для всех образцов.

Для определения значения внутренней квантовой эффективности (IQE) проводились измерения интегральной интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) в зависимости от интенсивности возбуждающего излучения при низкой (10 К) и комнатной (300 К) температур, по методике, предложенной в [2]. Для более подробного ознакомления с методикой измерения и особенностями определения IQE в светодиодных структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN см. работы [3–5]. В качестве возбуждающего источника использовался импульсный YAG-лазер со средней мощ-

[1] Работа выполнена при поддержке ГК № 14.516.11.0088 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 гг.».

ностью 35 мВт (1 кГц, длительность импульса 10 нс, длина волны 355 нм). Для достижения температуры 10 К использовался криостат фирмы «Janis». Спектры фотолюминесценции регистрировались оптоволоконным спектрометром Ocean Optics. Также на установке картографирования проводились измерения интенсивности, длины волны и ширины на полувысоте (FWHM) спектров фотолюминесценции при комнатной температуре (возбуждение фотолюминесценции проводилось YAG-лазером с длиной волны 266 нм) с разрешением 0.5 мм.

На рис. 1 приведены зависимости нормированной интегральной интенсивности фотолюминесценции (ИИФЛ) от интенсивности возбуждающего излучения для светодиодных структур с температурами роста слоя *p*-GaN: 940, 990 и 1060 °С. Зависимости ИИФЛ представлены для температур измерения 10 и 300 К. Как видно из рис. 1, для всех исследованных образцов зависимости ИИФЛ от интенсивности накачки имеют качественно схожее поведение. При температуре 10 К в области низких интенсивностей накачки ИИФЛ практические не изменяется и наблюдается небольшой спад при высоких уровнях накачки. В области низких интенсивностей возбуждения при низких температурах практически все сгенерированные излучением накачки электроны и дырки рекомбинируют с испусканием фотонов, так как носители заряда имеют очень низкую подвижность и вероятность их захвата на дефекты существенно ниже, чем при комнатной температуре. При этом в области высоких уровней накачки наблюдающийся спад ИИФЛ может быть связан с оже-рекомбинацией в квантовых ямах. При температуре 300 К вид зависимости ИИФЛ от интенсивности накачки может быть описан с помощью механизмов излучательной, Шокли – Рида и оже-рекомбинации.

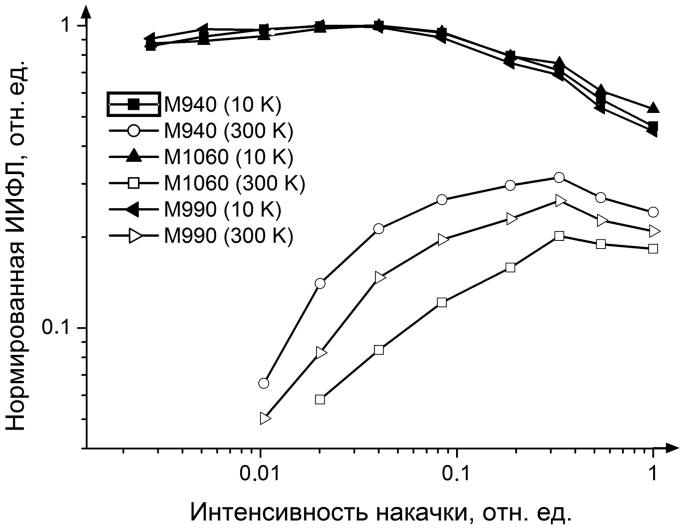

Рис. 1. Зависимость нормированной интегральной интенсивности фотолюминесценции исследованных образцов от интенсивности возбуждающего излучения при температурах измерения 10 и 300 К

Измерения ФЛ-характеристик спектров на установке картографирования показали высокую однородность характеристик по площади используемых двухдюймовых подложек. Средняя длина волны для исследованных структур составила 470–476 нм. При этом средняя по эпитаксиальной пластине интенсивность ФЛ для светодиодной структуры M940 (температура роста слоя *p*-GaN 940 °С) составила ~ 1.15 отн. ед., для светодиодной структуры M990 (температура роста слоя *p*-GaN 990 °С) – ~ 0.94 отн. ед., для светодиодной структуры M1060 (температура роста слоя *p*-GaN 1060 °С) – ~ 0.8 отн. ед. В связи с тем, что исследованные образцы выращивались при идентичных условиях, кроме температуры роста слоя *p*-GaN, уменьшение интенсивности ФЛ с повышением температуры роста слоя *p*-GaN скорее всего связано с диффузией атомов Mg в активную область. Дополнительным доводом в пользу данного предположения является уширение спектров ФЛ (рис. 2) с повышением температуры роста слоя GaN:Mg. В работе [6] показано, что диффузия Mg приводит к интердиффузии атомов In–Ga в слоях InGaN, что, в свою очередь, должно приводить к уширению спектров ФЛ. Средние значения FWHM по площади эпитаксиальной пластины составили 31.7, 32.1 и 39.6 нм для температур роста *p*-GaN в 940, 990 и 1060 °С соответственно.

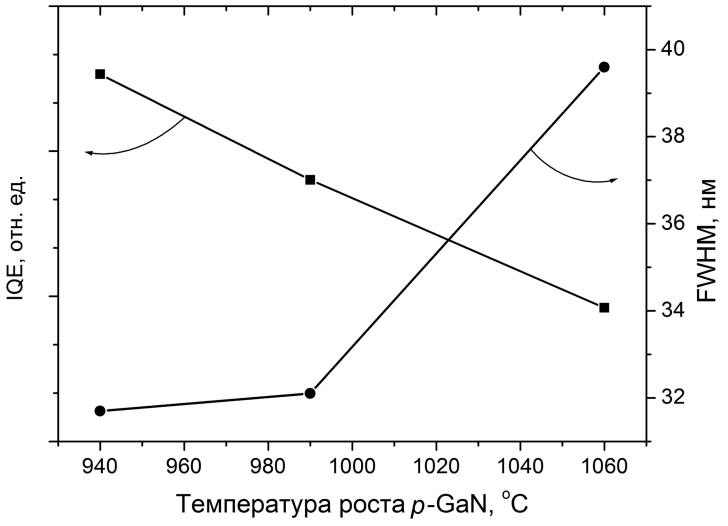

Рис. 2. Зависимость IQE и FWHM спектров ФЛ от температуры роста слоя *p*-GaN

Как видно из рис. 2, при увеличении температуры роста слоя *p*-GaN происходит монотонное уменьшение внутренней квантовой эффективности светодиодных структур. Это, видимо, связано с более интенсивной диффузией магния в активную область при увеличении температуры роста слоя *p*-GaN и, следовательно, образованием большей плотности дефектов, приводящих к гашению фотолюминесценции. Уменьшение IQE для светодиодной структуры с температурой роста слоя *p*-GaN в 1060 °C составило ~ 55 % относительно светодиодной структуры с температурой роста слоя *p*-GaN в 940 °C.

Таким образом, проведенные исследования влияния температуры роста слоя *p*-GaN в диапазоне температур 940–1060 °C показали монотонное уменьшение внутренней квантовой эффективности светодиодных структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN при увеличении температуры роста слоя *p*-GaN, что, видимо, связано с диффузией Mg в активную область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В. и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44. – С. 96.
2. Watanabe S., Yamada N., Nagashima M., et al. // Appl Phys. Lett. – 2002. – V. 83. – P. 4906.
3. Kohno T., Sudo Y., Yamauchi M., et al. // Jap. J. Appl. Phys. – 2012. – V. 51. – P. 072102.
4. Romanov I.S., Prudaev I.A., Marmalyuk A.A., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 56. – P. 760.
5. Prudaev I.A., Romanov I.S., Kop‘ev V.V., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 56. – P. 757.
6. McCluckey M.D., Romano L.T., Krusor B.S., et al. // Appl. Phys. Lett. – 1998. – V. 76. – P. 1281.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
**ООО «СигмПлюс», г. Москва, Россия
E-mail: rff.romis@gmail.com

Поступила в редакцию 18.11.13.

Романов Иван Сергеевич, аспирант;
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., технический директор;
Курешов Владимир Александрович, инженер;
Сабитов Дамир Равильевич, инженер;
Мазалов Александр Владимирович, инженер.