ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 7 ФИЗИКА 2013

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 СВЕРХРЕШЕТКИ НА ВНУТРЕННЮЮ КВАНТОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN [1]

Представлены результаты экспериментальных исследований внутренней квантовой эффективности светодиодных структур синего диапазона длин волн с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN и сверхрешетками.

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

Характерной особенностью физики соединений нитридов III-N является сочетание выдающихся практических результатов со слабой изученностью фундаментальных вопросов. Применительно к излучателям на основе нитридов наиболее изученными являются режимы роста светодиодных структур синего диапазона длин волн с простейшим дизайном. Для повышения их эффективности и разработки излучателей зеленого диапазона необходимо усложнение дизайна структуры, что приводит к более сложной зависимости параметров светодиодов от режимов роста [1, 2]. В данной работе проведены исследования внутренней и внешней квантовой эффективности светодиодных структур синего диапазона длин волн двух разных дизайнов, при этом некоторые образцы содержали короткопериодную сверхрешетку в буферной области.

Объектом исследования являлись светодиодные структуры с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Рост структур проводился на планарных и профилированных сапфировых подложках с ориентацией (0001). В работе исследованы две группы образцов. Светодиодные образцы группы *QB* выращивались на планарных сапфировых подложках и состояли из низкотемпературного зародышевого слоя, буферного слоя *i*-GaN толщиной 2 мкм, слоя *n*-GaN толщиной 2 мкм, активной области из 5 квантовых ям InGaN толщиной 2,5–3 нм (содержание InN в твердом растворе $In_xGa_{1-x}N$ составляло 10–15 %) и барьерных слоев GaN толщиной 3–15 нм, слоя *p*-GaN толщиной 140 нм. Также в некоторых образцах группы *QB* в буферной области выращивалась короткопериодная сверхрешетка InGaN/GaN с толщинами слоев по 1 нм. Образцы группы *LQB* выращивались на планарных и профилированных сапфировых подложках и состояли из низкотемпературного зародышевого слоя, буферного слоя *i*-GaN толщиной 4 мкм, слоя *n*-GaN толщиной 2 мкм, активной области из 10 квантовых ям InGaN толщиной около 3 нм и барьеров GaN толщиной 15 нм, слоя *p*-GaN толщиной 140 нм. В образцах группы *LQB* варьировалась толщина в пределах 5–15 нм последнего барьерного слоя GaN, который располагается между активной областью и слоем *p*-GaN.

Проведены исследования выращенных образцов методами электро- и фотолюминесценции. Для измерений электролюминесценции (ЭЛ) в образцы вплавлялись индиевые контакты. Измерения проводились при комнатной температуре при малых токах (до 5 мА) в импульсном режиме. Внешняя квантовая эффективность (*EQE*) оценивалась по углу наклона зависимости тока фотоприемника от тока через образец. Измерения фотолюминесценции (ФЛ) проводились в интервале температур 10–300 К с использованием оптического криостата. В качестве возбуждающего источника использовался импульсный YAG-лазер со средней мощностью 35 мВт (1 кГц, длительность импульса – 10 нс, длина волны – 355 нм). Для определения значения внутренней квантовой эффективности (*IQE*) проводились измерения интегральной интенсивности фотолюминесценции в зависимости от интенсивности возбуждающего излучения [3, 4].

На рис. 1 приведены зависимости нормированной внутренней квантовой эффективности от мощности возбуждающего излучения для образца *PSS LQB*-10, являющиеся типичными для всех исследованных образцов. В области малых мощностей накачки наблюдается резкий спад *IQE* с

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

ростом температуры, что обусловлено температурной зависимостью темпа безызлучательной рекомбинации. В области больших интенсивностей накачки на вид зависимости оказывает влияние темп оже-рекомбинации. Характерной особенностью зависимостей внутренней квантовой эффективности от мощности возбуждающего излучения является сдвиг максимума в область большей интенсивности накачки при увеличении температуры. Поэтому для структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN не применимы измерения *IQE* по температурной зависимости интегральной интенсивности ФЛ с постоянной мощностью возбуждения.

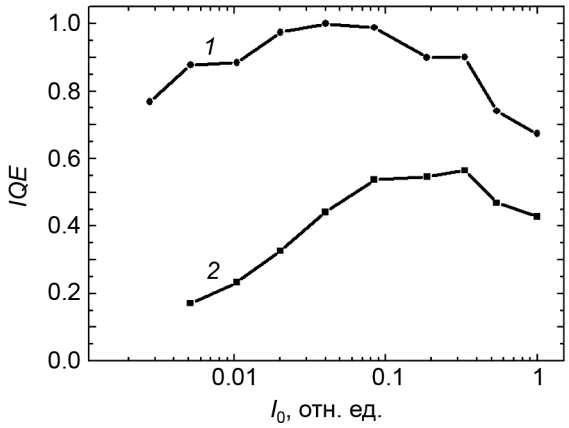

Рис. 1. Зависимости нормированной внутренней квантовой эффективности от мощности возбуждающего излучения для образца *PSS LQB*-10, измеренные при температурах 10 К (1) и 300 К (2)

В таблице приведены полученные в экспериментах значения *IQE* и *EQE* для образцов группы *LQB*, выращенных на планарных (*SS*) и профилированных (*PSS*) сапфировых подложках при толщинах последнего барьерного слоя GaN, составляющих 15 нм (*LQB*-15), 10 нм (*LQB*-10) и 5 нм (*LQB*-5).

Внутренние и внешние квантовые эффективности образцов группы *LQB*

Образец	Интенсивность ФЛ, отн. ед.	*IQE*, %	*EQE*, отн. ед.
SS LQB-15	1,28	–	0,09
PSS LQB-15	2,1	–	0,138
SS LQB-10	1,56	57,45	0,119
PSS LQB-10	2,74	56,5	0,166
SS LQB-5	3	49,15	0,124
PSS LQB-5	1,72	47,26	0,177

Как видно из таблицы, при уменьшении толщины последнего барьерного слоя GaN от 15 до 5 нм происходит увеличение *EQE*, независимо от типа подложки, в то время как при толщине последнего барьерного слоя 10 нм получено большее значение *IQE*, чем для образца с толщиной 5 нм. Вероятно, такое разночтение данных ФЛ и ЭЛ связано с разными механизмами появления носителей заряда в активной области. При измерениях *EQE* (режим электролюминесценции) носители заряда инжектируются в активную область из *n*- и *p*-эмиттерных слоев и, так как в GaN очень низкая подвижности дырок, это приводит к тому, что эффективная излучательная рекомбинация происходит в одной-двух ближайших к *p*-области квантовых ямах. Указанные квантовые ямы отделены от *p*-области последним барьерным слоем, толщина которого изменяется в исследованных образцах. Поэтому повышение значения *EQE* с уменьшением толщины барьерного слоя с 15 до 5 нм можно объяснить тем, что диффузионная длина дырок в GaN приблизительно равна 10–20 нм. При измерениях *IQE* (режим фотолюминесценции) генерация носителей заряда происходит под действием возбуждающего излучения по всей толщине активной области.

Из таблицы видно, что образцы, выращенные на *PSS*, обладают на 40–50 % большей интенсивностью ФЛ, чем аналогичные образцы, выращенные на планарных *SS*. Однако значения *IQE* для этих образцов (сравните *SS LQB*-10 и *PSS LQB*-10, *SS LQB*-5 и *PSS LQB*-5) практически не от-

личаются. Это объясняется тем, что в образцах, выращенных на *PSS*, увеличивается значение коэффициента вывода излучения по сравнению с образцами, выращенными на *SS*. При расчете же значения *IQE* используется отношение интегральной интенсивности ФЛ при комнатной температуре к интегральной интенсивности ФЛ при низкой температуре (10 К), что приводит к сокращению коэффициента вывода излучения. Поэтому измерения *IQE* позволяют напрямую сравнивать данные ФЛ для образцов, выращенных на *PSS* и *SS*.

В результате исследований образцов группы *QB* с разными толщинами барьерных слоев GaN в активной области (3–15 нм) и разными режимами роста светодиодных структур (в частности, температурами роста слоя *p*-GaN 940–1060 ºС) получены значения *IQE* в диапазоне 20–32 %. Наибольшее значение *IQE* для группы образов *QB*, выращенных на *SS*-подложках, получено в образце с толщиной барьерных слоев GaN 3 нм и короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN в буферной области. Значение *IQE* для этого образца составило 49,7 %. Такой рост *IQE*, видимо, связан с уменьшением плотности дислокаций и уменьшением величины пьезоэлектрических полей, вызванными, возможно, включением короткопериодной сверхрешетки в буферную область светодиодной структуры.

Таким образом, в работе проведены исследования и сравнения внутренней и внешней квантовых эффективностей светодиодных структур, выращенных на планарных и профилированных сапфировых подложках, с разными толщинами барьерных слоев, с дополнительной буферной сверхрешеткой и разными режимами роста образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лундин В.В. и др. // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 32. – Вып. 22. – С. 88–95.
2. Романов И.С. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/3. – С. 58–59.
3. Watanabe S. // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 83. – P. 4906.
4. Прудаев И.А. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/2. – С. 89–90.

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

Поступила в редакцию 17.06.13.

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.