

УДК 621.382.2

В.В. КОПЬЕВ, И.А. ПРУДАЕВ, И.С. РОМАНОВ

ПАДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ INGAN/GAN ПРИ ФОТО- И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ¹

В работе представлены результаты анализа падения квантовой эффективности в светодиодных структурах на основе InGaN/GaN при режимах фото- и электролюминесценции. Показано, что падение эффективности при комнатной температуре хорошо описывается АВС-моделью для обоих режимов накачки. При низких температурах, для объяснения падения эффективности при режиме электролюминесценции необходимо дополнительно учитывать баллистическую утечку электронов из активной области.

Ключевые слова: светодиоды, гетероструктуры, люминесценция, квантовая эффективность.

Квантовая эффективность светодиодных структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaN/GaN является предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований. Причиной этого является эффект падения эффективности, проявляющийся в её уменьшении с ростом плотности тока накачки выше чем $1-10 \text{ А/см}^2$ (при температуре $T = 300 \text{ К}$) и не связанный с перегревом светодиодных структур. Ранее был предложен подход, состоящий в исследовании температурных зависимостей квантовой эффективности и эффекта падения эффективности при различных условиях возбуждения люминесценции [1]. В этой работе представлены новые результаты исследования эффекта падения эффективности при использовании режима электролюминесценции (ЭЛ) и режима фотолюминесценции (ФЛ) с двумя видами оптической накачки с энергиями квантов возбуждающего излучения 3,49 и 3,06 эВ.

Исследования проводились для нескольких структур синей спектральной области, которые были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на сапфировой подложке в направлении [0001]. Активная область n -типа структуры содержала МКЯ и барьеры $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N/GaN}$ толщиной 2,5 и 15 нм соответственно. Толщина барьерного слоя из $p\text{-Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ составляла 30 нм. Общая толщина активной области составляла 200 нм. Из данной структуры изготавливались планарные светодиоды с омическими контактами Au/Ni и сопротивлением не более $10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. В ходе эксперимента измеряли зависимости квантовой эффективности η от тока и напряжения в интервале температур $T = 10 - 300 \text{ К}$ с использованием криостата фирмы Janis, источника измерителя Keithley 2636A и осциллографа LeCroy104Xs. Фотолюминесценцию возбуждали импульсным YAG-лазером со средней мощностью 35 мВт (0,2 – 1 кГц, длительность – 10 нс, 355 нм) и полупроводниковым импульсным лазером (0,2 – 90 кГц, длительность – 15 нс, 405 нм, импульсная мощность – 4 Вт). Драйвер для полупроводникового лазера был разработан на основе лавинного S -диода [2,3]. Для повышения плотности мощности лазерного излучения использовалась фокусировка лазерного пятна (минимальный диаметр лазерного пятна на образце составлял около 100 мкм). Спектры фотолюминесценции измерялись при помощи спектрометра Ocean Optics.

Для сравнения результатов измерений ЭЛ и ФЛ, экспериментальные зависимости были построены в координатах $\eta = \eta(n_{\text{inj}})$, квантовая эффективность η рассчитывалась по оптической мощности P , как P/n_{inj} . Значение n_{inj} представляет собой число носителей, инжектированных в секунду через единицу площади. В случае электрической накачки это значение вычислялось по формуле:

$$n_{\text{inj}} = \frac{I}{e \cdot S}, \quad (1)$$

где I – ток, e – элементарный заряд, S – площадь светодиода.

В случае оптической накачки вычисление значения n_{inj} затруднено, так как необходимо учесть количество отраженного от поверхности и поглощенного в p -слое излучения. Кроме того, для точного определения величины n_{inj} необходимо учитывать диффузию и рекомбинацию неравновесных носителей в p -слое. Поэтому для упрощения задачи использовалась нормировка.

¹ Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ № 13-02-98019

Известно, что в $[0001]$ InGaN/GaN светодиодах наблюдается сдвиг максимума спектра люминесценции в сторону более коротких длин волн с увеличением интенсивности накачки, и это объясняется влиянием эффекта Штарка [4]. Из анализа результатов эксперимента следует, что спектры люминесценции начинают смещаться в точке максимальной эффективности для комнатной температуры. Для электрической накачки эта точка соответствует $n_{inj} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, и она была использована для нормировки экспериментальных данных при использовании режима фотолюминесценции (рисунок 1).

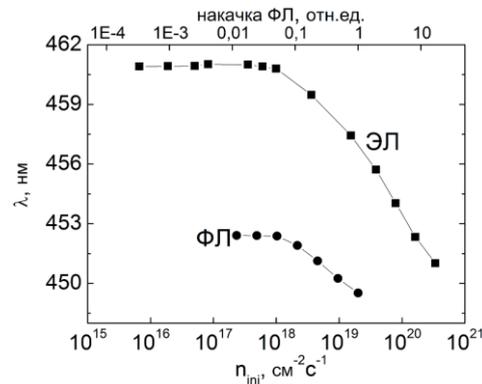


Рис. 1. Зависимости сдвига длины волны от плотности потока инжектированных носителей при $T = 300$ К. Верхняя ось соответствует данным фотолюминесценции.

Для определения абсолютной величины квантовой эффективности экспериментальные данные также нормировались. Считали, что при температуре $T = 10$ К и низком уровне возбуждения квантовый выход η составляет 100% для режимов ЭЛ и ФЛ. В эксперименте этот случай реализуется, во-первых, если при низком уровне инжекции не наблюдается значительной утечки носителей из квантовых ям в p -область. Во-вторых, при низком уровне инжекции квантовая эффективность определяется рекомбинацией Шокли-Рида и процессом излучательной рекомбинации. Первое условие, в данном эксперименте является верным, так как качество кристаллов светодиодных структур является высоким, и током утечки можно пренебречь по сравнению с величиной рекомбинационного тока (плотность дислокаций составляла около $(3 - 7) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$). Поэтому возможно использование АВС-модели для описания зависимостей внутренней квантовой эффективности от уровня инжекции для режима ФЛ:

$$\eta = \frac{B \cdot n^2}{A \cdot n + B \cdot n^2 + C \cdot n^3}, \quad (2)$$

где A , B , C – коэффициенты рекомбинации Шокли-Рида, излучательной и Оже, соответственно; $n \sim n_{inj}$ (для линейного режима рекомбинации) – стационарная концентрация неравновесных носителей в МКЯ.

Экспериментальные результаты для квантовой эффективности после нормировки представлены на рисунке 2. Квантовая эффективность, измеренная при $T = 300$ К, имеет одинаковые значения (56-65 %) для режимов ФЛ и ЭЛ. Кроме того, экспериментальные кривые имеют одинаковый вид. Отсюда следует, что для режима ЭЛ квантовая эффективность при комнатной температуре в основном описывается АВС-моделью (выражение (2)).

При низкой температуре ($T = 10$ К) экспериментальные результаты для режимов ФЛ и ЭЛ сильно различаются. Пороговое значение n_{inj} для начала падения эффективности смещается от $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (для ФЛ) до $10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (для ЭЛ).

Дополнительный анализ ВАХ показал, что при низких температурах баллистическая утечка электронов из активной области является наиболее вероятным механизмом, который определяет падение эффективности в InGaN/GaN светодиодах [5].

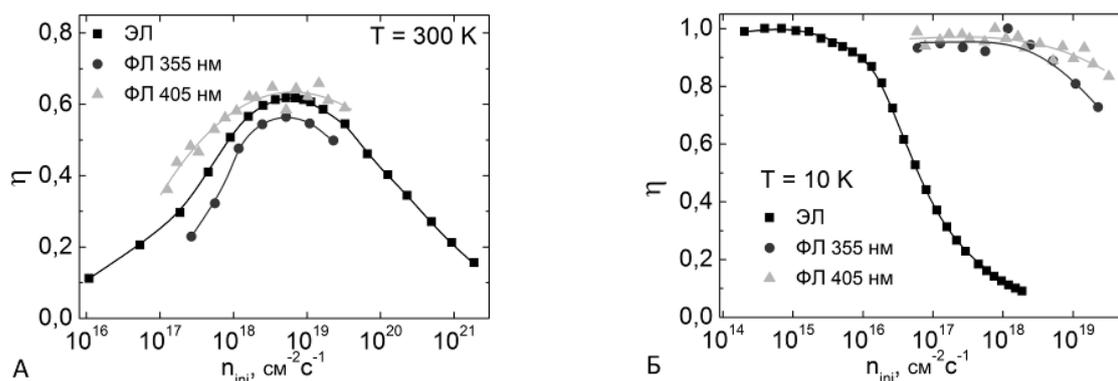


Рис. 2. Зависимости квантовой эффективности от плотности потока инжектированных носителей при $T = 300$ К (а) и при $T = 10$ К (б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прудаев И. А., Романов И.С., Копьев В.В. и др. // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 30–32.
2. Прудаев И. А., Хлудков С.С. // Изв. Вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 2. – С. 48–53.
3. Prudaev I.A., Khludkov S.S., Skakunov M.S. et. al // Instruments and Experimental Techniques. – 2010. – V. 53. – P. 530.
4. Chichibu S.F., Abare A.C., Mack M.P. et. al. // Mat. Sci. Eng. – 1999. – V. 59. – P. 298.
5. Prudaev I.A., Golygin I.Yu., Shirapov S.B. et. al. // Semiconductors. – 2013. – V. 47. – P. 1382.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: viktor.kopev@gmail.com

Копьев Виктор Васильевич, магистр;
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. н. с.;
Романов Иван Сергеевич, м.н.с.

V.V. KOPYEV, I.A. PRUDAEV, I.S. ROMANOV

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY DROOP IN InGaN/GaN LIGHT-EMITTING DIODES FOR ELECTRICAL AND OPTICAL PUMPING CONDITIONS

The analysis of efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes for electrical and optical pumping conditions is presented. The authors show that room temperature efficiency droop is well described by ABC-model for both pumping regimes. For low temperatures additional ballistic leakage should be considered to explain efficiency droop for the case of electrical pumping.

Keywords: light-emitting diodes, heterostructure, luminescence, quantum efficiency.

REFERENCES

1. Prudaev I.A., Romanov I.S., Kopyev V.V. et. al // Russian Physics Journal. – 2013. – V. 56. – P. 757.
2. Prudaev I.A., Khludkov S.S. // Russian Physics Journal. – 2009. – V. 52. – P. 163.
3. Prudaev I.A., Khludkov S.S., Skakunov M.S. et. al // Instruments and Experimental Techniques. – 2010. – V. 53. – P. 530.
4. Chichibu S.F., Abare A.C., Mack M.P. et. al. // Mat. Sci. Eng. – 1999. – V. 59. – P. 298.
5. Prudaev I.A., Golygin I.Yu., Shirapov S.B. et. al. // Semiconductors. – 2013. – V. 47. – P. 1382.

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: viktor.kopev@gmail.com

Kopyev Viktor Vasilyevich, Master of Science;
Prudayev Ilya Anatolyevich, Senior Researcher, PhD;
Romanov Ivan Sergeevich, Junior Researcher.