

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР
ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА
1550 НМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ИХ ОСНОВЕ**

Ковач Я.Н. Университет ИТМО, **Бабичев А.В.** Университет ИТМО, **Блохин С.А.**

Университет ИТМО, **Научные руководители – к. ф. м.-н., Колодезный Е.С.**

Университет ИТМО, **д. т. н. Карачинский Л.Я.** Университет ИТМО

В работе отображены результаты исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) шести наногетероструктур с различным уровнем легирования на основе механически-напряженных InGaAs КЯ, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Были исследованы изменения спектров ФЛ наногетероструктур в зависимости от температуры и мощности оптической накачки, определена температурная стабильности ширины спектра ФЛ.

Введение. В настоящее время растет потребность в истинных генераторах случайных чисел. Так, случайные последовательности используются в: математическом моделировании; криптографии; информационных технологиях и распределенных вычислениях. Прогнозируется, что генератор истинной случайной последовательности, основанный на вертикально-излучающем лазере (ВИЛ), будет являться дешевым и компактным решением. В свою очередь используемый для этих целей ВИЛ отличается от ВИЛ, применяемых для телекоммуникаций. Так, исследование спектров ФЛ полупроводниковых наногетероструктур позволяет провести качественный анализ сразу после их эпитаксиального роста, а именно: возможно определить энергию оптического перехода между основными состояниями электронов и дырок, влияние легирования структуры на эффективность излучательной рекомбинации и температурную стабильность. Выполненный анализ спектров ФЛ позволяет судить о пригодности аналогичных наногетероструктур для дальнейшего создания ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм и создания генератора случайных чисел на их основе.

Основная часть. В работе исследовались гетероструктуры, выращенные на подложке InP (100), в матрице $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,27}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ которых была сформирована активная область на основе девяти квантовых ям $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$ толщиной 3,7 нм. Было проведено легирование барьерных слоев толщиной 12 нм: три гетероструктуры *p*-типа, легированные углеродом с концентрациями 1, 2 и $5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$; две – *n*-типа, легированные кремнием с концентрациями 1 и $5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$, и одна – собственной проводимости. Для оптической накачки гетероструктуры использовался YAG:Nd лазер с длиной волны излучения 527 нм. Полученный пик ФЛ у всех гетероструктур приходился на 0,81 эВ, что соответствует длине волны 1530 нм – это переход между основными состояниями электронов и дырок в квантовой яме $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$. При этом абсолютные значения спектров ФЛ слабо отличались друг от друга. Также по местам перегиба на графике зависимости интегральной интенсивности ФЛ от плотности мощности накачки была определена плотность мощности возбуждения, при которой скорости излучательной и безизлучательной рекомбинаций равны: для всех легированных образцов, кроме гетероструктуры с концентрацией углерода $5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$, плотность мощности составила порядка 50 Вт/см^2 , что является признаком высокого оптического качества структуры. Для оценки температурной стабильности ширины спектра ФЛ было рассчитано среднеквадратичное отклонение (RMS) энергии кванта света от ее математического ожидания. Применение такого подхода позволяет более прецизионно оценить ширину спектра ФЛ в сравнении с FWHM. В результате гетероструктуры на основе кремния показали самый высокий RMS, что, вероятно, можно связать с рекомбинацией носителей в барьерных слоях –

так, при температурах ниже 180 К наблюдается появление второго пика в высокоэнергетической области спектра ФЛ.

Выводы. Было проведено исследование температурных зависимостей эффективности фотолюминесценции гетероструктур InGaAlAs/InGaAs/InP. Анализ интегральных интенсивностей ФЛ позволил определить точки перегиба и соответствующие плотности мощности накачки для состояния, когда скорости излучательной и безизлучательной рекомбинации равны. Определено, что средний уровень легирования барьерных слоев увеличивает эффективность излучательной рекомбинации при низких уровнях накачки. Ширина спектра для случая гетероструктур с легированием барьерных слоев превышает аналогичную величину для нелегированных образцов, что обусловлено заполнением дырочных уровней из барьерных слоев.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Ковач Я.Н.

Подпись

Колодезный Е.С.

Подпись