

06;07

Фотолюминесценция с длиной волны $1.55 \mu\text{m}$ при температуре 300 К из структур с квантовыми точками InAs/InGaAsN на подложках GaAs

© В.А. Одноблюдов, А.Ю. Егоров, Н.В. Крыжановская,
А.Г. Гладышев, В.В. Мамутин, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов

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

Поступило в Редакцию 22 мая 2002 г.

Впервые продемонстрирована фотолюминесценция на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ при комнатной температуре из квантовых точек (КТ) InAs/InGaAsN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs. Проведены исследования влияния встраивания азота в КТ InAs/InGaAsN на длину волны и интенсивность сигнала фотолюминесценции КТ. Интегральная интенсивность фотолюминесценции (ИИФЛ) в КТ InAs/(In)GaAsN на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ сравнима с ИИФЛ в квантовых ямах InGaAsN, излучающих на длине волны $1.3 \mu\text{m}$.

Введение. Широкое внедрение волоконно-оптических линий связи в локальных сетях сдерживается отсутствием надежной и дешевой элементной базы источников излучения. Это, прежде всего, вертикально излучающие лазеры, создание которых затруднено при использовании традиционных гетероструктур. Усилия многих лабораторий мира направлены на синтез гетероструктур, которые могли бы послужить основой более эффективных источников излучения в диапазоне длин волн $1.3\text{--}1.55 \mu\text{m}$, в альтернативу используемому в настоящее время гетероструктурам InGaAsP/InP. Указанные длины волн соответствуют окнам прозрачности оптического волокна, причем длина волны $1.3 \mu\text{m}$ отвечает минимуму дисперсии, а $1.55 \mu\text{m}$ минимуму поглощения.

В настоящее время альтернативой являются гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) InGaAsN/GaAs и квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs, создаваемые на подложках GaAs. Инжекционные лазеры, излучающие с торца [1,2], и вертикально излучающие лазеры [3,4] на длине волны $1.3 \mu\text{m}$ были успешно реализованы на основе этих

гетероструктур. Однако продвижение в сторону больших длин волн излучения, вплоть до $1.55\ \mu\text{m}$, для обоих типов гетероструктур затруднено вследствие принципиальных ограничений на состав и толщину КЯ, налагаемых пределом псевдоморфного роста.

Работы по продвижению в длинноволновую область спектра, опубликованные рядом научных лабораторий, не привели к получению эффективного излучения в районе $1.55\ \mu\text{m}$. ФЛ в окрестности длины волны $1.55\ \mu\text{m}$ была продемонстрирована с использованием КТ InAs/InGaAs в матрице GaAs, создаваемых при существенно пониженных температурах выращивания [5,6]. Излучение с длиной волны $1.55\ \mu\text{m}$ продемонстрировано путем добавления азота в КТ InAs [7], а также путем помещения КТ InAs в матрицу GaAsN [8], однако интенсивность сигнала ФЛ при использовании таких подходов была низка.

Увеличение мольной доли азота и индия в квантовой яме InGaAsN, излучающей на $1.3\ \mu\text{m}$, вместе со сдвигом длины излучения в область $1.55\ \mu\text{m}$, также приводило к существенному уменьшению интенсивности фотолюминесценции [9].

В настоящей работе в качестве объекта, модификация которого должна привести к излучению на $1.55\ \mu\text{m}$, были выбраны квантовые точки InAs/InGaAs, помещенные в слой GaAs и излучающие на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$. Мы продемонстрировали, что добавление азота в материал слоя InGaAs, которым осуществляется выращивание КТ InAs, приводит к существенному уменьшению ширины запрещенной зоны и понижает уровень размерного квантования в КТ InAs на величину, достаточную для сдвига пика фотолюминесценции вплоть до $1.55\ \mu\text{m}$. Эффективность излучательной рекомбинации в полученных объектах и в квантовых ямах InGaAsN при этом различается в 2 раза.

Эксперимент. Эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП-1203, оснащенной плазменным радиочастотным источником азота Epi Unibulb RF Plasma Source и твердотельным источником мышьяка. Образцы выращивались при температуре подложки 470°C . Гетероструктуры с квантовыми точками синтезировались непосредственно в процессе выращивания на начальных стадиях осаждения InAs на GaAs, ориентации (001), с использованием механизма роста Странски–Крастанова [10]. КТ выращивались слоем InGaAsN с содержанием азота 0–2%. В результате формировался новый объект — КТ InAs/InGaAsN, который был окружен либо слоями GaAs, либо слоями GaAsN толщиной $0 \div 1000\ \text{Å}$ и мольной долей азота 0–2.5% (далее материал

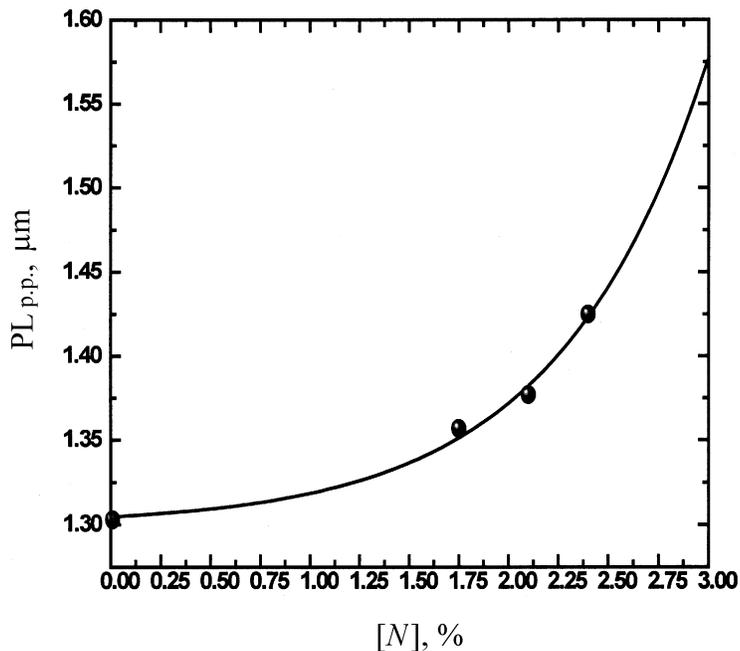


Рис. 1. Зависимость максимума длины волны излучения КТ InAs, зарощенных $\text{In}_{15\%}\text{GaAs}$, помещенных в матрицу GaAsN, от мольной доли азота в GaAsN. Символами отмечены экспериментальные данные, сплошной линией — интерполяция экспериментальных данных экспоненциальной функцией.

окружающего слоя мы будем называть матрицей). Измерения спектров фотолюминесценции проводились охлаждаемым германиевым фотодетектором при возбуждении ФЛ аргоновым лазером с плотностью возбуждения 100 W/cm^2 . Содержание азота в матрице определялось из тестовых образцов GaAsN методом рентгеновской дифракции, с помощью измерений кривых качания вблизи рефлекса (004) GaAs. Точность измерений составила 0.01% азота.

Обсуждение результатов. В первом цикле экспериментов КТ InAs/InGaAs, излучающие на $1.3 \mu\text{m}$, помещались в слой GaAsN. На рис. 1 представлена зависимость длины волны излучения для этих

КТ от содержания азота в матрице GaAsN. Из рисунка видно, что добавление азота в матрицу GaAs приводит к значительному длинноволновому сдвигу максимума фотолюминесценции КТ, а экспериментальные данные хорошо интерполируются экспоненциальной функцией ($f(x) = 1.3 + 0.005 \cdot \exp(x/0.74)$). Данная аппроксимация не имеет физического смысла, однако позволяет прогнозировать величину длинноволнового сдвига максимума фотолюминесценции КТ в зависимости от состава по азоту в матрице. Содержание азота в матрице, необходимое для достижения длины волны 1.55 мкм, можно оценить, экстраполируя полученную функцию в область больших составов по азоту. Таким образом, добавление порядка 3% азота в GaAs, возможно, приведет к достижению длины волны 1.55 мкм. Увеличение содержания азота в матрице систематически приводило к уменьшению интенсивности сигнала ФЛ.

Для второго цикла экспериментов была выбрана гетероструктура с КТ InAs/InGaAsN, помещенными в середину слоя GaAsN_{2.5%} толщиной 1000 Å. Добавление всего 0.85% азота в зарращивающий слой In_{15%}GaAs КТ InAs привело к сдвигу длины волны фотолюминесценции до 1.55 мкм. Уменьшение толщины матрицы GaAsN при сохранении концентрации азота в матрице и в слое InGaAsN, которым зарращивались КТ, приводит к увеличению интенсивности фотолюминесценции, однако положение спектра ФЛ при этом не меняется. Результаты второго цикла экспериментов представлены на рис. 2. Излучение с длиной волны 1.55 мкм соответствует излучательным переходам внутри КТ. Второй пик ФЛ с максимумом интенсивности на длине волны 1.17 мкм соответствует излучению матрицы GaAsN_{2.5%}. Очевидна тенденция к увеличению интенсивности излучения при неизменном положении максимума в районе длины волны 1.55 мкм и подавлению сигнала ФЛ с длиной волны 1.17 мкм при уменьшении толщины слоя матрицы. Таким образом, при уменьшении толщины матрицы наблюдается преимущественная рекомбинация неравновесных носителей через состояния КТ. Зависимость относительной интегральной интенсивности сигнала ФЛ от толщины матрицы GaAsN представлена на вставке рис. 2.

Полная замена материала матрицы GaAsN на GaAs при сохранении состава КТ, спектры которых были представлены на рис. 2, привела к коротковолновому сдвигу максимума спектра ФЛ, однако позволила значительно увеличить интенсивность сигнала. Коротковолновый сдвиг частично удалось скомпенсировать без потери интенсивности с по-

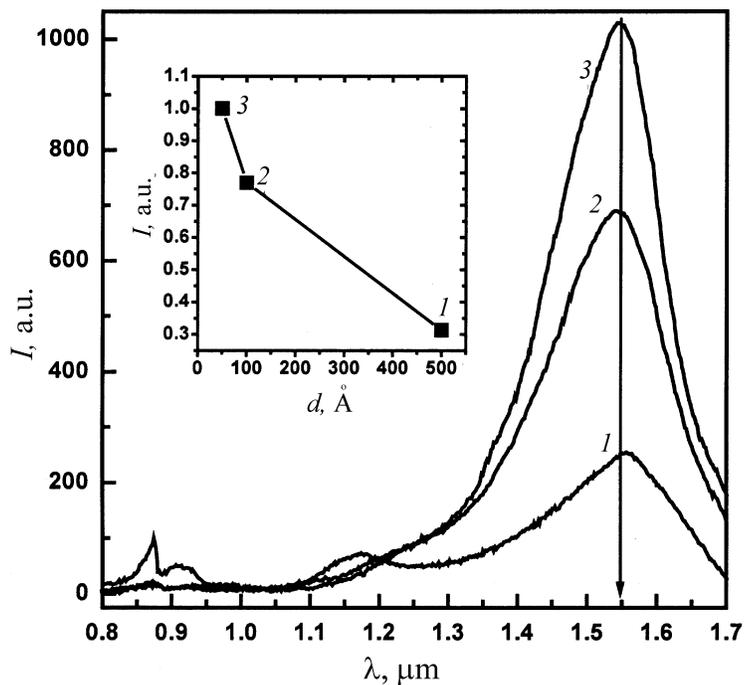


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции для структур с КТ InAs, зарощенных $\text{In}_{15\%}\text{GaAsN}_{0.85\%}$, помещенных в матрицу $\text{GaAsN}_{2.5\%}$ толщиной: 1 — 1000 Å, 2 — 200 Å, 3 — 100 Å. На вставке изображена зависимость относительной интегральной интенсивности фотолюминесценции образцов 1, 2, 3 от толщины матрицы.

мощью увеличения среднего состава по азоту в зарощивающем слое InGaAsN с 0.84 до 1.5%. Интегральная интенсивность излучения такой структуры возросла примерно в 18 раз по сравнению со структурой, в которой КТ $\text{In}(\text{Ga})\text{As}(\text{N})$ помещены в матрицу GaAsN толщиной 100 Å. В результате интенсивность фотолюминесценции структуры с КТ $\text{InAs}/\text{InGaAsN}$ в матрице GaAs (максимум — $1.54\ \mu\text{m}$) стала сравнима (рис. 3) с интенсивностью фотолюминесценции гетероструктуры с квантовой ямой (КЯ) $\text{GaAs}/\text{In}_{0.36}\text{GaAs}_{0.98}\text{N}_{0.02}/\text{GaAs}$, выращенной в

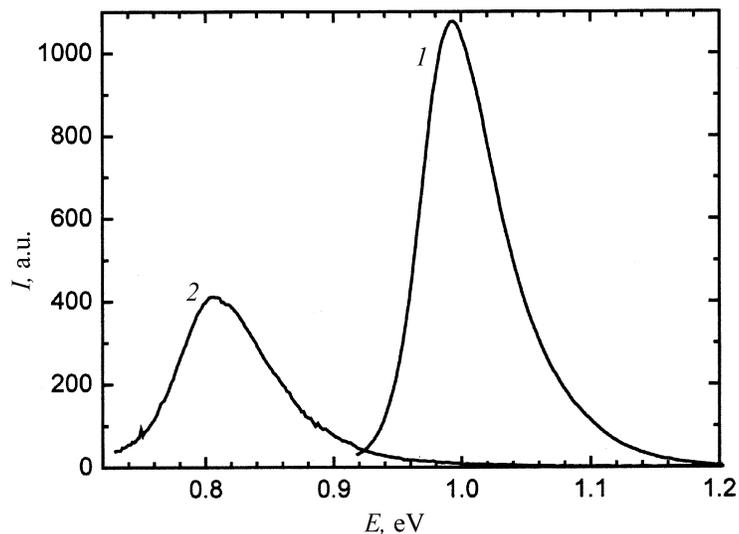


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции для структур: 1 — КЯ InGaAsN в матрице GaAs, 2 — КТ InAs/In_{15%}GaAsN_{1.5%} в матрице GaAs.

качестве тестовой структуры (максимум — $1.26 \mu\text{m}$). Использование КЯ InGaAsN [2] подобного состава в качестве активной области инжекционных лазеров привело к демонстрации низкопороговой генерации на длине волны $1.3 \mu\text{m}$. Дальнейшее увеличение интенсивности излучения структур с КТ InAs/InGaAsN в матрице GaAs мы связываем с обработкой процедуры отжига. Возможно, что для сохранения положения максимума сигнала ФЛ на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ потребуются незначительное увеличение содержания азота в заращивающем слое InGaAsN.

Заключение. Таким образом, впервые получена фотолюминесценция на длине волны вблизи $1.55 \mu\text{m}$ из КТ InAs/InGaAsN в матрице GaAs на подложках GaAs (001), сравнимая с интенсивностью фотолюминесценции гетероструктуры с КЯ GaAs/In_{0.36}Ga_{0.64}As_{0.98}N_{0.02}/GaAs. Проведено исследование зависимости длины волны и интенсивности излучения от содержания азота в матрице и в заращивающем слое, а также от толщины матрицы. Выяснено, что увеличение мольной доли азота в матрице закономерно ведет к длинноволновому сдвигу максимума

фотолюминесценции, а уменьшение толщины матрицы увеличивает интенсивность сигнала. Добавление азота в зарращивающий слой КТ и помещение такой системы в матрицу GaAs позволяет резко увеличить интенсивность фотолюминесценции (≈ 18 раз), однако приводит к коротковолновому сдвигу положения пика, который удается частично скомпенсировать увеличением содержания азота в зарращивающем слое.

Настоящая работа была выполнена при поддержке программы „Физика твердотельных наноструктур“, программы NATO Science for Peace (грант SfP-972484), гранта CRDF (RE1-2221), а также гранта РФФИ (02-02-17677).

Один из авторов, В.М. Устинов, выражает благодарность „Фонду содействия отечественной науке“.

Список литературы

- [1] *Ustinov V.M., Zhukov A.E.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2000. V. 15. R41.
- [2] *Egorov A.Yu. et al.* // *Journal of Crystal Growth.* 2001. V. 227, 228. P. 545–552.
- [3] *Maleev N.A. et al.* // *Semiconductors.* 2001. V. 35(7). P. 847–853.
- [4] *Lott J.A. et al.* // *Electr. Lett.* 2000. V. 36 (5). P. 1384.
- [5] *Жуков А.Е. и др.* // *Письма в ЖТФ.* 2001. Т. 27 (17). С. 51–56.
- [6] *Тонких А.А. и др.* // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28 (10). С. 72–77.
- [7] *Sopanen M. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. P. 994–996.
- [8] *Egorov A.Yu. et al.* // *International Symposium QD 2000. Munich, August 2000.*
- [9] *Fisher M., Reinhardt M., Forhel A.* // *Electronics Letters.* 2000. V. 36 (14). P. 1208–1209.
- [10] *Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.N.* *Quantum dot heterostructures.* John Wiley & Sons Ltd. Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO 19 1UD, England, 1999.