

# Низкопороговые инжекционные лазеры на основе одиночных квантовых ям InGaAsN, работающие в диапазоне длин волн 1.3 мкм

© В.А. Одноблюдов, А.Ю. Егоров, М.М. Кулагина, Н.А. Малеев, Ю.М. Шерняков, Е.В. Никитина, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 октября 2003 г. Принята к печати 21 октября 2003 г.)

Исследована конструкция активной области инжекционных лазеров на основе одиночных квантовых ям InGaAsN. Продемонстрирована длинноволновая (1.27–1.3 мкм), низкопороговая ( $< 400 \text{ А/см}^2$ ), высокоэффективная ( $> 50\%$ ) лазерная генерация при комнатной температуре в структурах на основе одиночных квантовых ям InGaAsN, в барьерах GaAs или InGaAsN. Исследованы основные характеристики лазеров (пороговые, температурные, мощностные) в геометрии широкого полоска для структур с активной областью указанных типов. Проведен сравнительный анализ характеристик инжекционных лазеров с активной областью различных конструкций.

## 1. Введение

Создание инжекционных лазеров на основе GaAs, работающих в области длин волн 1.3 мкм, является в настоящий момент важной исследовательской и прикладной задачей. Подобные структуры являются альтернативой лазерам на основе системы материалов InGaAsP/InP. Ожидается, что они лягут в основу дешевой элементной базы телекоммуникационных систем, приведя к широкому распространению волоконно-оптической связи в локальных компьютерных сетях. Принципиальным преимуществом структур на основе GaAs перед фосфидиндиевыми аналогами является возможность эпитаксиального выращивания структур для вертикально излучающих лазеров в одном ростовом цикле.

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) InGaAsN/GaAs и квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs являются основными кандидатами для использования в качестве активной области инжекционных лазеров на основе арсенида галлия, работающих в области длин волн 1.3 мкм. Инжекционные лазеры, как с резонатором Фабри–Перо [1,2], так и вертикально излучающие с распределенными брэгговскими отражателями [3], с длиной волны генерации в области 1.3 мкм были успешно реализованы на основе обоих типов гетероструктур.

Технологические проблемы, существующие при выращивании четверного соединения InGaAsN, стимулируют интерес к исследованию различных конструкций активной области лазеров на основе КЯ InGaAsN. Подобные исследования необходимы для создания лазеров, отвечающих требованиям их использования в качестве источников излучения для волоконно-оптических линий связи.

Существуют две основные конструкции гетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN, излучающих на длине волны 1.3 мкм. Основное различие состоит в том, что в одном случае слой узкозонного материала InGaAsN помещается между слоями арсенида галлия. В этом случае ширина запрещенной зоны барьерных слоев соответствует ширине запрещенной зоны GaAs. В другом случае материалом барьерных слоев является соединение InGaAsN иного элементного состава,

ширина запрещенной зоны которого меньше GaAs, но больше ширины запрещенной зоны материала квантовой ямы. Помещение КЯ InGaAsN в барьеры (In)GaAsN, решеточно-согласованные с арсенидом галлия, позволяет изменять параметры (толщину и элементный состав) КЯ InGaAsN при сохранении неизменной длины волны излучения.

В ходе исследования нами проведен тщательный анализ и оптимизация условий синтеза структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а также опробованы разные конструкции активной области инжекционных лазеров на основе КЯ InGaAsN в матрицах GaAs и InGaAsN. Сравнительный анализ приборных характеристик лазеров с активными областями указанных типов выявил значительное преимущество подхода, базирующегося на использовании решеточно-согласованных с GaAs слоев InGaAsN в качестве барьеров для КЯ InGaAsN. Наименьшее достигнутое значение пороговой плотности тока составило  $390 \text{ А/см}^2$  для лазера в геометрии широкого полоска с длиной резонатора 2000 мкм. Наименьшее значение плотности тока прозрачности для указанной структуры —  $190 \text{ А/см}^2$ . Внешняя дифференциальная квантовая эффективность прибора указанной геометрии (длина резонатора 2000 мкм) составила 50% в импульсном режиме. Также продемонстрирована лазерная генерация в непрерывном режиме, с эффективностью 0.48%. Исследована температурная стабильность пороговой плотности тока и длины волны генерации для лазеров обоих типов.

## 2. Методика эксперимента

Структуры выращивались на установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) ЭП-1203, оснащенной плазменным радиочастотным источником азота Epi Unibulb RF Plasma Source и твердотельным источником мышьяка. Температура выращивания активной области лазерных структур составила  $400^\circ\text{C}$ . Лазерные структуры содержат эмиттеры  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  толщиной 1.5 мкм и волновод из GaAs толщиной 0.5 мкм. В качестве активной области использовались КЯ InGaAsN в барьерных

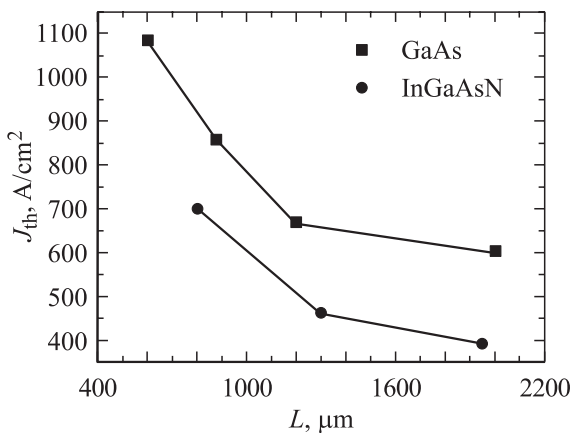
слоях GaAs (структура 1) и InGaAsN (структура 2). Процесс выращивания контролировался методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ).

Из лазерных структур были изготовлены приборы полосковой конструкции (ширина полоска 100 мкм) с различной длиной резонатора  $L = 600\text{--}2000$  мкм. Измерения характеристик полосковых лазеров проводились при импульсной инжекционной накачке с длительностью импульса 0.2 мкс и частотой 1 кГц. Непрерывный режим генерации реализовывался при стабилизации температуры тепловода.

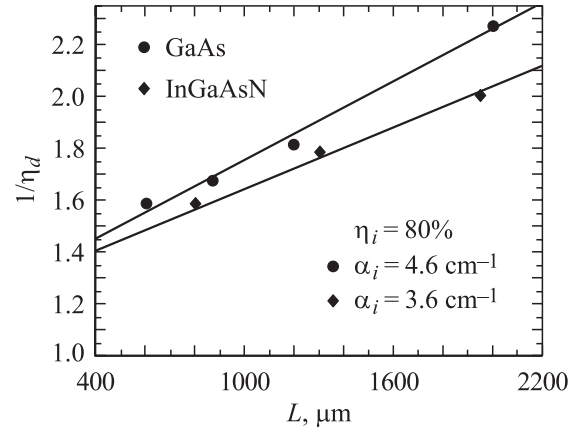
### 3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости пороговой плотности тока  $J_{th}$  от длины резонатора  $L$  для лазеров на основе КЯ InGaAsN в барьерных слоях GaAs и InGaAsN. Из рисунка видно, что во всем диапазоне длин резонаторов пороговая плотность тока для лазеров, изготовленных из структуры 2, меньше, чем для лазеров, изготовленных из структуры 1. Наименьшая достигнутая пороговая плотность тока составила  $390\text{ А/см}^2$  для лазера с длиной резонатора 1950 мкм. Данное значение пороговой плотности тока для лазеров на основе КЯ InGaAsN, работающих вблизи длины волны 1.3 мкм, находится среди лучших опубликованных результатов. Для той же длины резонатора (1950 мкм) пороговая плотность тока прибора на основе структуры 1 составила  $600\text{ А/см}^2$ .

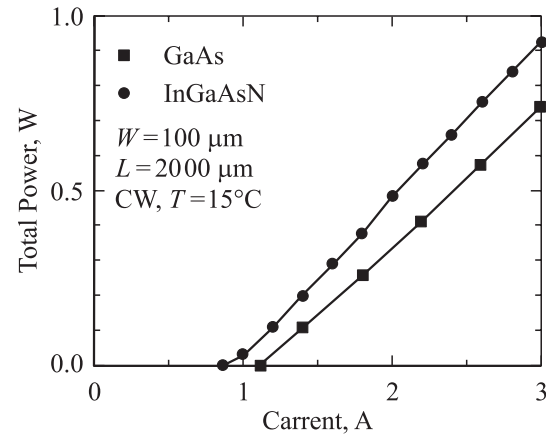
Экспериментальные зависимости обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора  $L$  для лазеров, изготовленных из структур 1 и 2, представлены на рис. 2. Внешняя дифференциальная эффективность приборов на основе структуры 2 выше во всем диапазоне длин резонаторов. Для резонатора длиной 1950 мкм значение  $\eta_d$  составило 50%. Максимальное достигнутое значение  $\eta_d = 64\%$  — для резонатора длиной 800 мкм. Из экспериментальных зависимостей  $\eta_d$  от



**Рис. 1.** Зависимости пороговой плотности тока  $J_{th}$  от длины резонатора  $L$  для лазеров, изготовленных из структур 1 (GaAs-барьеры) и 2 (InGaAsN-барьеры).



**Рис. 2.** Зависимости обратной внешней дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора  $L$  для лазера, изготовленного из структур 1 и 2. Символами отмечены экспериментальные данные, сплошные линии — экстраполяция экспериментальных данных.

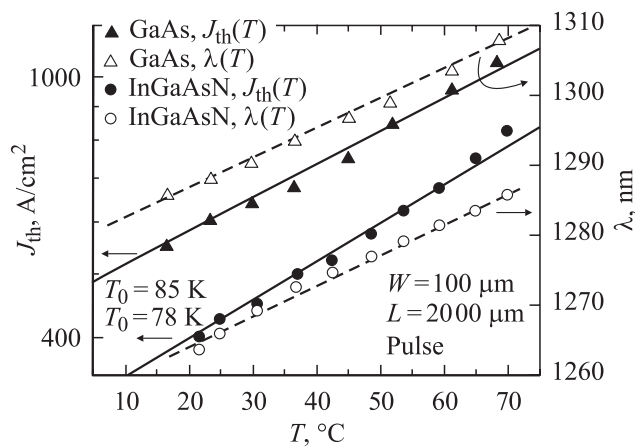


**Рис. 3.** Зависимости полной выходной оптической мощности лазеров, изготовленных из структур 1 и 2, от тока накачки при генерации в непрерывном режиме.

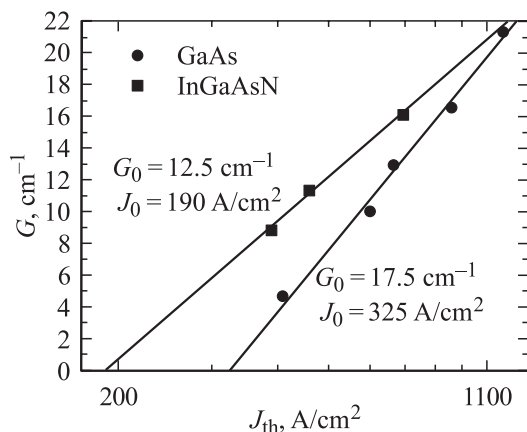
длины резонатора были рассчитаны внутренние потери ( $\alpha_i$ ) в лазерах, изготовленных из структур 1 и 2. При использовании в качестве активной области КЯ InGaAsN в барьерных слоях GaAs величина внутренних потерь составила  $\alpha_i = 4.6\text{ см}^{-1}$ . Использование барьерных слоев InGaAsN, решеточно-согласованных с арсенидом галлия, позволило снизить внутренние потери до  $\alpha_i = 3.6\text{ см}^{-1}$ . Внутренняя дифференциальная эффективность приборов  $\eta_i$  на основе обоих типов структур одинакова и равна 80%.

Таким образом, использование барьеров InGaAsN позволило значительно снизить пороговую плотность тока, увеличить внешнюю дифференциальную эффективность и уменьшить величину внутренних потерь.

Лазерная генерация в непрерывном режиме была продемонстрирована на обоих типах структур при стабилизированной температуре теплоотвода  $15^\circ\text{C}$ . На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости полной



**Рис. 4.** Температурные зависимости пороговой плотности тока  $J_{th}$  и длины волны генерации  $\lambda$  для лазеров, изготовленных из структур 1 и 2. Сплошными символами отмечены экспериментальные данные  $J_{th}(T)$ , открытыми символами обозначены экспериментальные данные  $\lambda(T)$ . Линии — экстраполяция экспериментальных данных.



**Рис. 5.** Зависимости усиления  $G$  от пороговой плотности тока в лазерах  $J_{th}$ , изготовленных из структур 1 и 2. Символами отмечены экспериментальные данные, линии — экстраполяция экспериментальных данных.

выходной оптической мощности от тока накачки для лазеров с длиной резонатора 2000 мкм. Пороговая плотность тока  $420 \text{ A/cm}^2$  и эффективность от  $0.47 \text{ Вт/А}$  продемонстрированы для лазера, изготовленного из структуры 2. Соответствующие показатели для лазера на основе структуры 1 составили  $550 \text{ A/cm}^2$  и  $0.39 \text{ Вт/А}$ .

Для лазеров, изготовленных из структур 1 и 2, была исследована также температурная стабильность пороговой плотности тока и длины волны генерации. На рис. 4 представлены указанные экспериментальные зависимости для лазеров с длиной резонатора 2000 мкм. Характеристическая температура для лазеров на основе КЯ InGaAsN в барьерных слоях GaAs составила  $T_0 = 85 \text{ К}$ , на основе КЯ InGaAsN в барьерных слоях InGaAsN —  $T_0 = 78 \text{ К}$ . Замена материала барьерных слоев GaAs на InGaAsN привела к незначительному

уменьшению характеристической температуры. Однако зависимость длины волны генерации от температуры одинакова для обоих типов лазеров, а коэффициент зависимости составляет  $\Delta\lambda/\Delta T = 0.43 \text{ нм/К}$ .

На основании результатов измерений зависимостей внешней дифференциальной эффективности и пороговой плотности тока от длины резонатора были рассчитаны зависимости усиления ( $G$ ) от пороговой плотности тока  $J_{th}$  в лазерах, изготовленных из структур 1 и 2. Зависимости  $G(J_{th})$  представлены на рис. 5. Значения коэффициента усиления  $G_0$  и плотности тока прозрачности  $J_0$  были определены из зависимости  $G(J_{th})$ . Указанные величины составили: для лазеров на основе структуры 1 —  $G_0 = 17.5 \text{ см}^{-1}$  и  $J_0 = 325 \text{ A/cm}^2$ , для лазеров на основе структуры 2 —  $12.5 \text{ см}^{-1}$  и  $190 \text{ A/cm}^2$  соответственно. Использование решеточно-согласованных с GaAs барьерных слоев InGaAsN позволило значительно снизить значение плотности тока прозрачности в сравнении со случаем использования барьерных слоев GaAs, однако привело к уменьшению коэффициента усиления. Достигнутое минимальное значение  $J_0 = 190 \text{ A/cm}^2$  находится среди лучших опубликованных результатов.

## 4. Заключение

В работе были исследованы характеристики инжекционных лазеров на основе КЯ InGaAsN, помещенных в барьерные слои GaAs или InGaAsN. Продемонстрирована лазерная генерация в приборах, изготовленных из обоих типов структур, в импульсном и непрерывном режимах. Выяснено, что использование барьеров InGaAsN в активной области лазера приводит к уменьшению пороговой плотности тока и плотности тока прозрачности ( $\sim 1.5$  раза), а также к увеличению внешней дифференциальной эффективности. Указанные закономерности сопровождаются незначительным уменьшением характеристической температуры  $T_0$  лазеров на основе структуры 2 ( $\sim 5\text{--}7 \text{ К}$ ) и уменьшением коэффициента усиления  $G_0$ .

Работа была выполнена при поддержке программы Министерства науки и технологий РФ „Физика твердотельных наноструктур“, Российского фонда фундаментальных исследований и проекта NATO Science for Peace Program (SfP).

В.М. Устинов выражает благодарность Фонду содействия отечественной науке.

## Список литературы

- [1] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **15**, R41 (2000).
- [2] A.Yu. Egorov, D. Bernklau, B. Borchert, S. Illek, D. Livshits, A. Rucki, M. Schuster, A. Kaschner, A. Hoffman, Gh. Dumitras, M.C. Amann, H. Riecher. *J. Cryst. Growth*, **227-228**, 545 (2001).

- [3] Н.А. Малеев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **35** (7), 881 (2001). [Semiconductors, **35** (7), 847 (2001)].

Редактор Т.А. Полянская

## Low threshold current 1.3 micron lasers based on single InGaAsN quantum wells

V.A. Odnoblyudov, A.Yu. Egorov, M.M. Kulagina,  
N.A. Maleev, Yu.M. Shernyakov, E.V. Nikitina,  
V.M. Ustinov

Ioffe Physicotechnical Institute  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Active region design of the InGaAsN quantum well (QW) lasers was investigated. Long wavelength (1.27–1.3  $\mu\text{m}$ ), low threshold current ( $< 400 \text{ A/cm}^2$ ), high efficiency ( $> 50\%$ ) lasing at room temperature are demonstrated. Threshold, temperature and power characteristics of the broad area stripe lasers were studied for two types of active regions: InGaAsN QW with the GaAs and InGaAsN barriers. Comparative analysis of lasers based on different types of the active region was done.