

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ГЕТЕРОЛАЗЕР НА ОСНОВЕ МАССИВОВ ВЕРТИКАЛЬНО СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs В МАТРИЦЕ GaAs

© Ж.И.Алферов, Н.А.Берт, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, П.С.Копьев,
А.О.Косогов, И.Л.Крестников, Н.Н.Леденцов, А.В.Лунев,
М.В.Максимов, А.В.Сахаров, В.М.Устинов, А.Ф.Цацульников,
Ю.М.Шерняков, Д.Бимберг*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской Академии Наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия.

*Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 23 ноября 1995 г. Принята к печати 26 ноября 1995 г.)

Впервые продемонстрирована лазерная генерация через основное состояние экситона в вертикально связанных квантовых точках вплоть до 300 К. При 80 К пороговая плотность тока составила $J_{th} \sim 40 \text{ А/см}^2$. В диапазоне 80–180 К зависимость пороговой плотности тока от температуры описывается значением характеристической температуры $T_0 = 430 \text{ К}$.

В настоящее время одним из основных направлений современной физики полупроводников является получение и исследование структур с размерностью ниже чем 2: квантовых проводов и квантовых точек. Первые лазеры с активной областью на основе квантовых точек в системе (In, Ga)As/GaAs продемонстрировали предсказанное ранее теоретически [1] высокое значение характеристической температуры T_0 и низкую пороговую плотность тока J_{th} ($T_0 = 425 \text{ К}$, $J_{th} \sim 80 \text{ А/см}^2$ в диапазоне температур 50–120 К) [2,3]. При комнатной температуре тепловой выброс носителей из точек приводил к ухудшению рабочих характеристик и сдвигу энергии генерации в коротковолновую сторону (т.е. в область энергий, близких к энергии оптического перехода в двумерном смачивающем слое). Для увеличения максимального коэффициента усиления и, соответственно, улучшения рабочих характеристик лазеров на квантовых точках весьма перспективно использование массивов вертикально связанных квантовых точек (ВСКТ) InAs в матрице GaAs. Такие массивы позволяют повысить перекрытие световой волны с активной областью лазера, что может приводить к возрастанию усиления и снижению порогового тока.

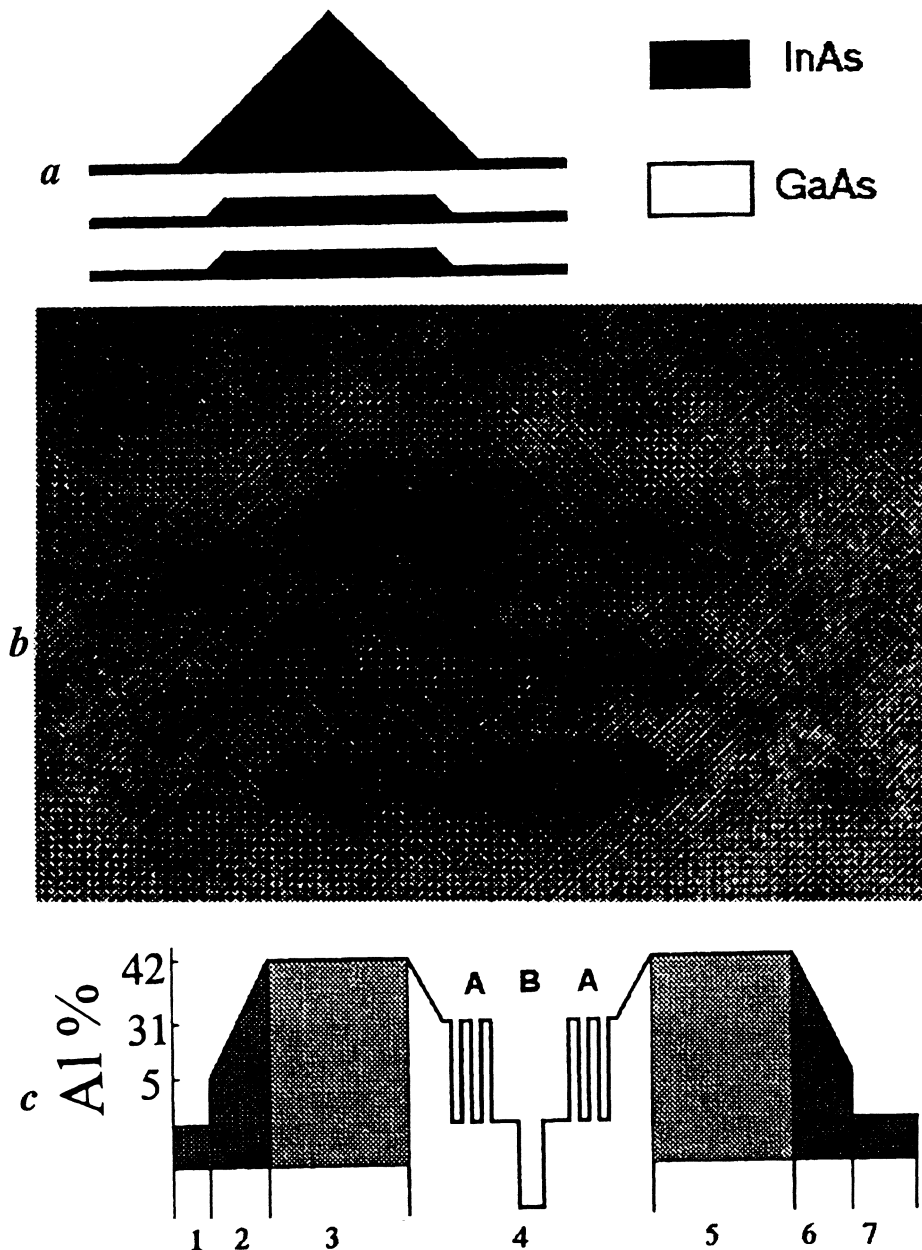


Рис. 1. *a* — схематическое изображение вертикально связанных квантовых точек (ВСКТ); *b* — изображение поперечного сечения массива ВСКТ, полученное при помощи электронной микроскопии высокого разрешения; *c* — схематическое изображение лазерной структуры с ВСКТ. Размеры областей, мкм: 1, 2, 6 — 0.2; 3, 5 — 1.5; 4 — 0.4; 7 — 0.6. Тип и концентрация примеси, 10^{18} см^{-3} : 1, 2 — 4 (Si); 3 — 2 (Si); 5 — 0.7 (Be); 6, 7 — 20 (Be). В области 4: А — 20 периодов сверхрешетки AlGaAs(20 Å)/GaAs(10 Å), В — ВСКТ, вставленные в квантовую яму GaAs толщиной 800 Å.

Массивы ВСКТ формировались путем последовательного осаждения нескольких циклов, каждый из которых состоит из слоя InAs толщиной 1.7 монослоя и слоя GaAs толщиной 40 \AA . Теоретическое рассмотрение физики роста таких структур [4] в соответствии с моделью Странски-Крастанова показало, что при этом образуется новый объект — упорядоченный массив вертикально связанных квантовых точек, что полностью подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Схематическое изображение ВСКТ представлено на рис. 1,а. Каждая точка состоит из трех вертикально упорядоченных частей InAs, разделенных прослойками GaAs с толщинами 2–4 монослоя. Верхняя часть имеет латеральные размеры порядка 170 \AA , а нижняя часть — порядка 110 \AA (рис. 1,б). Электронные и дырочные состояния в соседних островках являются туннельно-связанными. Точки имеют квадратные основания со сторонами, расположенными вдоль направлений $[001]$ и $[010]$, и образуют примитивную квадратную решетку в горизонтальной плоскости (в плоскости подложки). При комнатной температуре в спектре фотолюминисценции (ФЛ) такой структуры наблюдается интенсивная

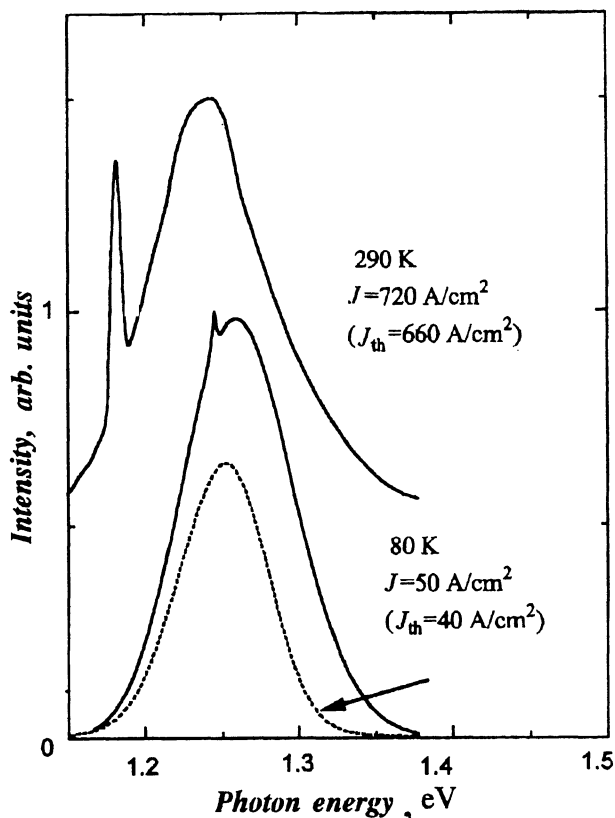


Рис. 2. Спектры люминисценции лазерной структуры с ВСКТ при 80 и 290 К, а также спектр фотолюминисценции (штриховая линия) той же структуры, у которой при помощи химического травления были удалены верхний эмиттер и контактный слой.

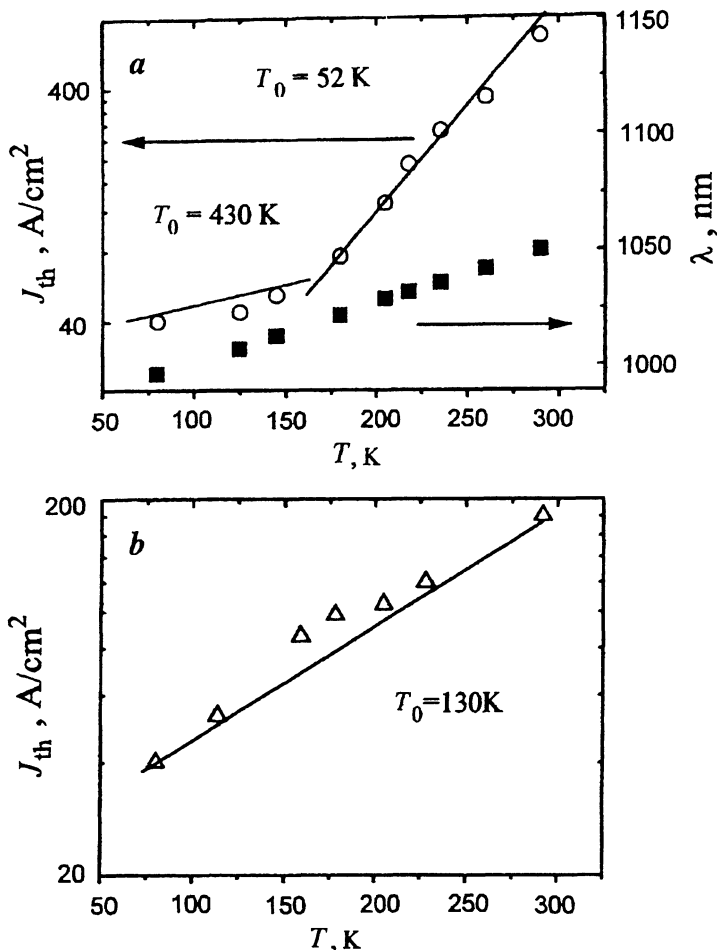


Рис. 3. Зависимость пороговой плотности тока J_{th} и длины волны генерации λ от температуры T для лазера с активной областью на основе ВСКТ (а) и одиночной квантовой ямы (б).

линия, обусловленная основными состояниями электронов и дырок в туннельно-связанных точках [4,5].

В данной работе проведено исследование электролюминесцентных характеристик лазерной структуры с активной областью на основе упорядоченного массива ВСКТ. Схематическое изображение структуры для лазерных исследований представлено на рис. 1,с. Температура роста при осаждении эмиттерных и контактных слоев составляла 600 °С, а при осаждении ВСКТ — 485 °С. Для исследования ФЛ верхний контактный слой образцов удалялся при помощи химического травления. Люминисценция возбуждалась линией 632.8 нм He-Ne-лазера, для детектирования использовался охлаждаемый германиевый фотодетектор. Для минимизации потерь на выходе и достижения минимальной плотности порогового тока для электролюминесцентных исследований были выбраны лазеры с 4 сколотыми гранями, имевшие плотность по-

рогового тока на 30–40% ниже полосковых лазеров с широким контактом и длиной резонатора порядка 1000 мкм. Измерение рабочих характеристик проводилось при импульсной накачке (длительность импульсов 100 нс, частота повторения 5 кГц), в температурном диапазоне 80–300 К.

На рис. 2 представлен спектр электролюминесценции лазерной структуры на основе ВСКТ. Вплоть до комнатной температуры при малых и умеренных плотностях возбуждения энергия лазерной генерации соответствует максимуму спектра ФЛ. Таким образом, генерация осуществляется через основное состояние ВСКТ. Зависимость пороговой плотности тока и длины волны генерации от температуры представлена на рис. 3,а. В диапазоне температур 80–150 К пороговая плотность тока практически не изменяется и составляет 40 А/см². Зависимость длины волны генерации от температуры следует за температурной зависимостью ширины запрещенной зоны GaAs. При температурах наблюдения выше 180 К начинается резкий рост пороговой плотности тока. Данный факт наблюдался ранее в лазерах с одним слоем квантовых точек из InAs [3] при температуре 80 К и обусловлен термическим испарением носителей из квантовых точек, энергия локализации которых не достаточно велика. В случае лазера на основе ВСКТ пороговая плотность тока как при 80 К, так и при 300 К существенно ниже, чем в лазере с одним слоем квантовых точек из InAs. Кроме того, температура, при которой начинается термический выброс носителей в область смачивающего слоя и, соответственно, резкое увеличение T_0 , в случае ВСКТ возрастает до 180 К. Таким образом, использование ВСКТ позволяет улучшить рабочие характеристики лазеров. Необходимо отметить, что пороговая плотность тока для лазерной структуры с одиночной квантовой ямой (In_{0.13}Ga_{0.87}As) имеет температурную зависимость, описываемую характеристической температурой $T_0 = 130$ К во всем диапазоне 80–300 К (см. рис. 3,б). Таким образом, ход температурной зависимости пороговой плотности тока существенно отличается для лазеров с квантовой ямой и квантовыми точками, что отражает различный вид плотности состояний для этих случаев.

Итак, в данной работе показано, что использование вертикально-связанных квантовых точек позволяет как реализовать лазерную генерацию через основное состояние квантовых точек вплоть до комнатной температуры, так и существенно увеличить диапазон температурной стабильности порогового тока.

Авторы выражают благодарность Р.В. Золотаревой за подготовку образцов.

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований, Международным научным фондом Дж. Сороса и программой INTAS (грант 94-1028).

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki Appl. Phys. Lett., **40**, 939 (1982).
- [2] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gossele, J. Heydenreich. Electron. Lett., **30**, 1416 (1994).
- [3] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, R. Heits, J. Bohrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Richter, U. Gossele, J. Heydenreich. Invited talk om 7th Int. Conf. on Modul. Semicond. Struct. (Madrid, 1995), to be published in Sol. St. Electron.
- [4] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Bohrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, A.I. Borovkov, A.O. Kosogov, S.S. Ruvimov, U. Gossele, J. Heidenreich. Phys. Rev. Lett., submitted.
- [5] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Ф. Папульников, Н.А. Берг, А.О. Косоков, Д. Бимберг, Ж.И. Алферов. ФТП (в печати).

Редактор Т.А. Полянская

Injective heterolaser based on vertical coupled InAs quantum dots in GaAs matrix

*Zh.I. Alferov, N.A. Bert, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, A.O. Kosogov, I.L. Krestnikov, N.N. Ledentsov, A.V. Lunev, M.V. Maximov, A.V. Sakharov, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, Yu.M. Shernyakov, D. Bimberg**

A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy Science,
194021 St. Petersburg, Russia.

*Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

We bring first evidence of room temperature injection lasing via ground state of vertically coupled quantum dots. In the temperature range 80–180 K the treshhold current density is about 40 A/cm² and the characteristic temperature is 430 K.

