

Экспериментальное исследование температурной зависимости пороговых характеристик в полупроводниковых вертикально излучающих лазерах на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек

© С.А. Блохин[¶], А.В. Сахаров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Р. Ковш^{*}, С.С. Михрин^{*}, G. Lee[×], J.Y. Chi[×]

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

^{*} NL-Nanosemiconductors GmbH, 44227 Dortmund, Germany

[×] Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu, 310, Taiwan, Republic of China

(Получена 6 февраля 2006 г. Принята к печати 17 февраля 2006 г.)

Экспериментально исследована температурная зависимость величины порогового тока для полупроводникового вертикально излучающего лазера на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек. Продемонстрировано, что для корректного описания температурных характеристик приборов следует использовать величину рассогласования между длиной волны генерации и максимумом спектра усиления (расстройку). Предложена форма описания температурной зависимости порогового тока вертикально излучающего лазера, учитывающая не только падение максимального усиления активной области с температурой, но и влияние температурной зависимости величины расстройки.

PACS: 42.55.Px, 85.60.Jb, 73.21.La

1. Введение

Разработка, создание и исследование полупроводниковых вертикально излучающих лазеров (ВИЛ, VCSELs — *vertical cavity surface emitting lasers*) — одно из активно развивающихся направлений современной полупроводниковой оптоэлектроники. ВИЛ находят широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа, высокопроизводительных компьютерных системах [1,2]. В отличие от традиционных полосковых лазеров конструкция ВИЛ обеспечивает вывод излучения в вертикальном направлении, перпендикулярном плоскости полупроводниковой подложки. В качестве верхнего и нижнего зеркал, ограничивающих вертикальный микрорезонатор Фабри–Перо, используются распределенные брэгговские отражатели (РБО). В силу симметричной формы и относительно большого размера (несколько микрон) излучающей области ВИЛ обладают существенно более узкой и симметричной диаграммой направленности выходного оптического излучения по сравнению с полосковыми лазерами. Кроме того, планарная технология изготовления и возможность измерения основных приборных характеристик непосредственно на полупроводниковой пластине до ее разделения на кристаллы позволяют существенно снизить стоимость изготовления ВИЛ, а также формировать интегральные массивы излучателей, в том числе с индивидуальной адресацией.

Одним из существенных преимуществ ВИЛ по сравнению с традиционными лазерами полосковой геометрии является относительно высокая температурная стабильность длины волны λ лазерного излучения ($d\lambda/dT \approx 0.05–0.09$ нм/К для GaAs/AlGaAs ВИЛ [3]). Она обусловлена дисперсионно-температурной зависимостью эффективного показателя преломления оптического микрорезонатора [4]. В то же время температурный сдвиг положения максимума спектра усиления активной области связан с температурным изменением ширины запрещенной зоны, что определяет намного более сильную температурную зависимость длины волны генерации в полосковых лазерных диодах ($d\lambda/dT \approx 0.3–0.4$ нм/К для InGaAs/GaAs-гетероструктур [1]). Следует отметить, что в случае ВИЛ относительно высокое последовательное сопротивление РБО и многопроходное поглощение спонтанного излучения в направлении роста может приводить к большему температурному сдвигу максимума спектра усиления активной области по сравнению с традиционными торцевыми лазерами [3]. Усиление активной области растет с током инжекции (увеличением уровня накачки) и падает с ростом температуры [5]. Вследствие значительного теплового сопротивления ВИЛ увеличение тока инжекции сопровождается существенным увеличением температуры активной области, что приводит к уменьшению максимального усиления при больших токах накачки. Таким образом, спектральное положение резонансной длины волны ВИЛ относительно спектра усиления активной области будет оказывать существенное влияние

[¶] E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

на температурную зависимость порогового тока и выходной мощности излучения [6].

Для анализа температурных характеристик ВИЛ удобно ввести понятие расстройки $\Delta\lambda$ (*detuning*), равной величине сдвига длины волны лазерной генерации ВИЛ (резонансной длины волны оптического микрорезонатора) относительно максимума спектра усиления активной среды. Отметим, что величина расстройки существенно зависит от температуры.

Адекватный анализ температурных зависимостей ВИЛ на основе квантовых точек необходим для решения задач по оптимизации параметров активной области и конструкции приборов с целью получения требуемых приборных характеристик в широком диапазоне температур. В этом случае корректное определение величины расстройки особенно важно, поскольку ВИЛ с активной областью на основе квантовых точек обладают относительно широким спектром усиления, а форма и положение максимума спектра усиления существенно зависят от уровня тока накачки [7].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование температурной зависимости величины порогового тока для структуры полупроводникового вертикально излучающего лазера на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек и предложена корректная форма описания температурной зависимости порогового тока ВИЛ, учитывающая не только ухудшение излучательных характеристик активной области с температурой, но и влияние температурной зависимости величины расстройки $\Delta\lambda(T)$.

2. Эксперимент

Исследуемые в настоящей работе структуры ВИЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, легированных Si, с ориентацией (001) в установке RIBER49. Эпитаксиальная структура состоит из нижнего РБО, содержащего 33 пары четвертьволновых слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *n*-типа, нелегированного Al_{0.15}Ga_{0.85}As оптического резонатора с толщиной, равной резонансной длине волны, и верхнего РБО, содержащего 20 пар четвертьволновых слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *p*-типа. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения длины волны генерации вблизи 980 нм. В качестве легирующих примесей *p*- и *n*-типа использовались углерод и кремний соответственно. Для снижения омического сопротивления интерфейсы GaAs–Al_{0.9}Ga_{0.1}As в РБО содержат переходные слои толщиной 10 нм с градиентом по составу Al и высоким уровнем легирования (С и Si: $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно). В качестве активной области использовались массивы InGaAs-квантовых точек, полученных методом субмонослойного осаждения (SML — *submonolayer*) [8]. Оптический резонатор содержит активную область на основе трех слоев SML InGaAs-квантовых точек, помещенных

в области максимума оптического поля, и апертурный слой *p*-(AlAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As) с высоким уровнем легирования, помещенный в минимум оптического поля для минимизации потерь, обусловленных дифракцией на селективно-оксидированной апертуре [9].

С помощью фотолитографии, сухого травления в пучке ионов Ag⁺ и латерального селективного оксидирования слоев Al_xGa_{1-x}As были изготовлены меза-структуры диаметром 48 мкм с глубиной травления порядка 3.6 мкм и токовой апертурой диаметром 12 мкм. Для формирования омических контактов к слоям *n*- и *p*-типа использовалась металлизация AuGe/Ni/Au и AuZn соответственно. Более подробное описание технологии формирования ВИЛ с легированными РБО приведено в работах [10,11]. Для измерений спектральных и мощностных характеристик в диапазоне температур образцы ВИЛ напаивались на медные теплоотводы *n*-контактом вниз при помощи индиевого припоя.

Из выращенных структур были также изготовлены лазеры полосковой конструкции с шириной полоска 50 мкм с длиной резонатора в пределах 0.4–2 мм. На грани резонатора, полученные скалыванием, диэлектрические покрытия не наносились. Пассивация сколотых граней не производилась. Для температурных измерений образцы напаивались на медные теплоотводы *p*-контактом вниз при помощи индиевого припоя.

Приборные характеристики лазеров обоих типов исследовались в температурном диапазоне 15–50°C (точность стабилизации температуры 0.5°C) при импульсной инжекционной накачке (для минимизации эффекта саморазогрева активной области) с длительностью импульса 500 нс и частотой повторений 1 кГц. Спектральные характеристики лазеров детектировались монохроматором и германиевым фотодиодом, включенным в схему синхронного детектирования.

Отметим, что легированные AlGaAs/GaAs РБО в исследуемой структуре ВИЛ сконструированы таким образом, чтобы обеспечить максимальную однородность инжекции носителей в активную область по площади токовой апертуры прибора. Кроме того, вследствие подавления латеральной диффузии носителей (в случае квантовых точек) и малого расстояния (~160 нм) от токовой апертуры до активной области латеральным растеканием тока можно пренебречь. В результате величина плотности тока *J* в ВИЛ может быть оценена как

$$J = I/S, \quad (1)$$

где *I* — величина тока накачки, *S* — площадь, ограниченная токовой апертурой.

3. Результаты и обсуждение

Для обеспечения эффективной работы ВИЛ при заданной рабочей температуре необходимо согласовать между собой спектральное положение резонансной дли-

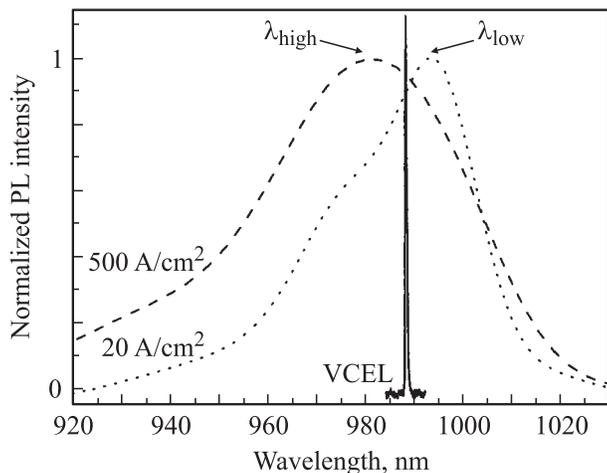


Рис. 1. Спектры лазерной генерации ВИЛ на пороге (сплошная линия) и электролюминесценции при плотности тока накачки 20 A/cm^2 (точечная линия) и 500 A/cm^2 (штриховая линия).

ны волны, задаваемое геометрией эпитаксиальной структуры ВИЛ, и максимума спектра усиления активной области. С этой целью структуру ВИЛ проектируют так, чтобы при температурах меньше рабочей длина волны максимума спектра усиления была меньше расчетной длины волны генерации ВИЛ [12]. Однако как теоретический расчет, так и экспериментальное определение спектра усиления активной области является достаточно сложной задачей. В результате на практике при проектировании ВИЛ вместо спектров усиления используются спектры фото- и электролюминесценции, а вместо резонансной длины волны реальной лазерной структуры — спектры отражения тестовых структур. Данный подход оправдан при использовании активных областей на основе квантовых ям, поскольку они обладают малой шириной спектра усиления. В то же время в случае квантовых точек спектр усиления значительно уширен вследствие неоднородного уширения [7]. Кроме того, форма и положение максимума спектра усиления, равно как и максимумов спектров фото- или электролюминесценции, существенно зависят от уровня накачки.

На рис. 1 приведены спектры лазерной генерации для исследуемого ВИЛ на пороге (фактически определяемый положением резонансной длины волны) и спектры электролюминесценции полоскового лазера, изготовленного из той же эпитаксиальной структуры, при малой (20 A/cm^2) и высокой (500 A/cm^2) плотности тока инжекции, измеренные при температуре 15°C . Отметим, что резонансная длина волны ВИЛ в данном случае находится между максимумами спектров электролюминесценции для низкого (λ_{low}) и высокого (λ_{high}) уровней накачки. При использовании широко распространенной оценки величины расстройки как разницы между по-

ложением максимума спектра электролюминесценции и длиной волны генерации ВИЛ возникает неопределенность. Поэтому в случае активной области на основе квантовых точек для корректного и однозначного определения величины расстройки во всех случаях необходимо использовать положение максимума спектра усиления при плотности тока накачки, соответствующего режиму генерации ВИЛ. В связи с этим актуальна задача определения длины волны, соответствующей максимуму спектра усиления активной области ВИЛ.

На рис. 2 приведена зависимость порогового тока I_{th} в ВИЛ от температуры. Экспериментальные зависимости порогового тока лазерного диода от температуры обычно принято описывать эмпирическим соотношением [3]

$$I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}(300 \text{ K}) \exp((T - 300)/T_0), \quad (2)$$

где T_0 — характеристическая температура. Однако данное выражение не учитывает влияния рассогласования максимума спектра усиления и длины волны генерации, которое проявляется в сильной зависимости порогового тока от резонансной длины волны ВИЛ [1]. Можно предложить следующую форму описания температурной зависимости порогового тока ВИЛ

$$I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}^{\text{cor}} \exp(T/T_0), \quad (3)$$

где первый множитель $I_{\text{th}}^{\text{cor}} = f(\Delta\lambda(T))$ описывает скорректированную зависимость порогового тока ВИЛ от величины расстройки $\Delta\lambda(T)$, а второй — температурный рост порогового тока, обусловленный уменьшением усиления активной области с температурой и термическим выбросом носителей [13]. Величина T_0 определяется свойствами активной области и может быть найдена из анализа характеристик полосковых лазеров, изготовленных непосредственно из эпитаксиальной структуры ВИЛ.

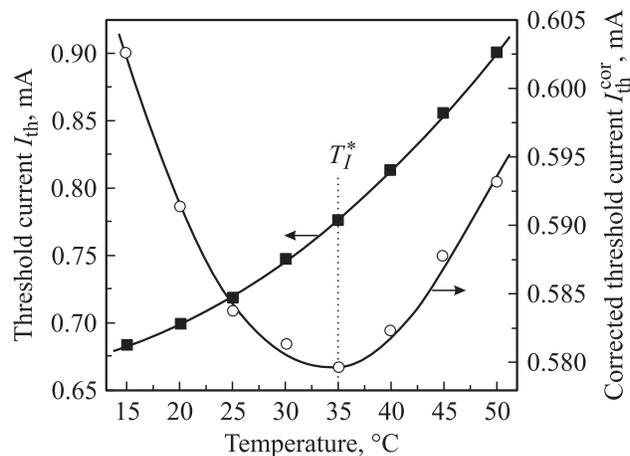


Рис. 2. Температурная зависимость порогового тока (■) ВИЛ и скорректированная зависимость порогового тока (○) ВИЛ.

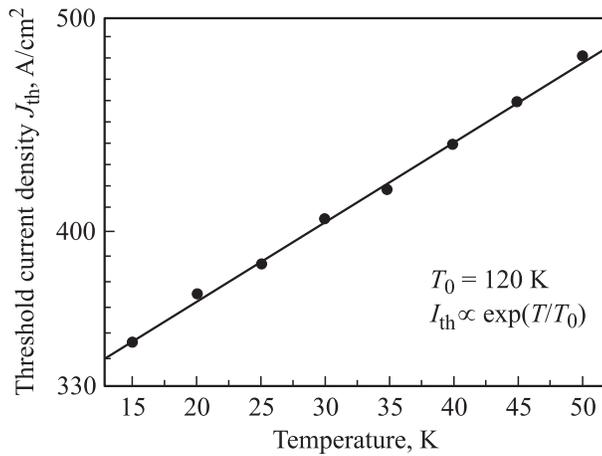


Рис. 3. Температурная зависимость пороговой плотности тока для лазеров полосковой конструкции с длиной резонатора 1 мм.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость пороговой плотности тока от температуры для полосковых лазеров с длиной резонатора 1 мм. В диапазоне 15–50°C температурная зависимость порогового тока хорошо описывается зависимостью (3) со значением характеристической температуры $T_0 = 120$ К. Найденное значение T_0 сравнимо с результатами, полученными ранее для полосковых лазеров на основе субмонослойных квантовых точек [14].

Измерив температурную зависимость порогового тока ВИЛ и зная величину характеристической температуры T_0 для полосковых лазеров, можно определить зависимость скорректированного порогового тока от температуры, как показано на рис. 2. При температуре $T_l^* = 35^\circ\text{C}$ достигается минимум температурной зависимости I_{th}^{cor} .

Рассмотрим теперь, как зависит от температуры величина расстройки $\Delta\lambda$. Для того чтобы определить температурную зависимость спектрального положения максимума усиления, были проведены измерения длины волны генерации при пороговом токе для полосковых лазеров во всем рассматриваемом диапазоне температур. Длина резонатора лазерных диодов варьировалась в пределах 0,4–2 мм. Условием возникновения лазерной генерации является баланс между оптическим усилением и суммарными оптическими потерями, включающими потери на вывод излучения и внутренние потери в лазерной структуре [5]. Таким образом, генерация на пороге возникает в максимуме спектра усиления активной области. Следовательно, можно построить зависимость длины волны лазерного излучения, соответствующей максимуму усиления, от плотности тока накачки при различных температурах. На рис. 4 приведены указанные зависимости в диапазоне температур 15–50°C.

Зная экспериментальную зависимость пороговой плотности тока ВИЛ от температуры, можно определить длину волны излучения полоскового лазера, соответствующую максимальному усилению при заданной плотности тока и температуре. На рис. 5 представлены температурные зависимости длины волны лазерной генерации на пороге для ВИЛ и длина волны генерации полоскового лазера, соответствующая максимальному усилению при плотности тока, равной пороговой плотности тока ВИЛ. Для сравнения приведена температурная зависимость длины волны максимума спектра электролюминесценции, измеренная при малой плотности тока накачки. Отметим, что температура, соответствующая нулевой расстройке T_g^* ($\Delta\lambda(T) = 0$), при которой достигается совпадение резонансной длины волны ВИЛ с длиной волны максимального усиления активной области,

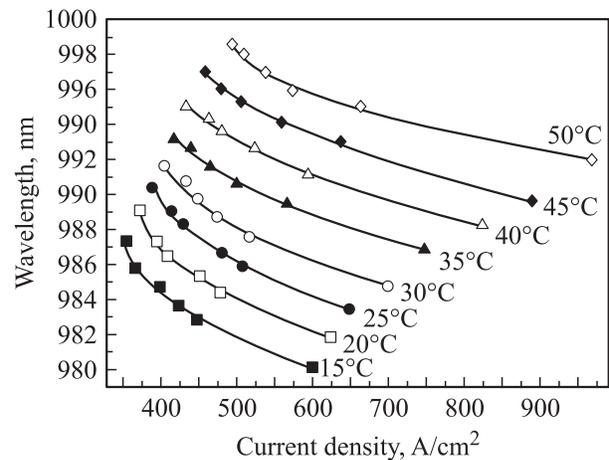


Рис. 4. Зависимость длины волны излучения, соответствующей максимуму усиления активной области, от плотности тока в диапазоне температур 15–50°C.

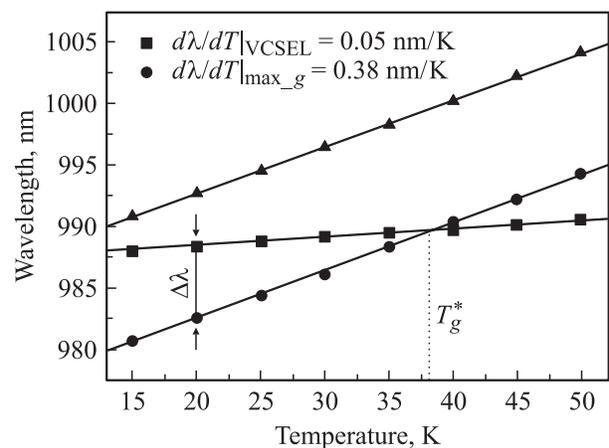


Рис. 5. Температурная зависимость длины волны лазерной генерации на пороге для ВИЛ (■), длины волны в максимуме спектра электролюминесценции, измеренной при малой плотности тока накачки (▲), и длины волны, соответствующей максимуму усилению активной области при плотности тока накачки, равной пороговой плотности тока ВИЛ (●).

составляет 38°C . В то же время, при оценке величины расстройки на основе температурной зависимости длины волны максимума спектра электролюминесценции, нулевая расстройка достигается при температуре 7°C , что не может объяснить эффективную работу исследуемого ВИЛ при высоких температурах [10]. Следует отметить, что температура T_l^* , при которой достигается минимум температурной зависимости $I_{\text{th}}^{\text{cor}}$, близка к температуре нулевой расстройки T_g^* .

Таким образом, можно сформулировать следующий способ корректного определения величины расстройки для ВИЛ:

- 1) определение температурной зависимости порогового тока и длины волны генерации на пороге ВИЛ в импульсном режиме;
- 2) определение температурной зависимости порогового тока и длины волны генерации на пороге для полосковых лазеров в импульсном режиме в широком диапазоне длин резонаторов;
- 3) построение зависимости длины волны, соответствующей максимуму усиления активной области, от плотности тока накачки и температуры;
- 4) нахождение температурной зависимости длины волны, соответствующей максимуму усиления при пороговой плотности тока накачки ВИЛ;
- 5) определение температурной зависимости расстройки как спектрального расстояния между длиной волны, соответствующей максимальному усилению при пороговой плотности тока ВИЛ, и длиной волны генерации на пороге ВИЛ;
- 6) определение температуры нулевой расстройки T_g^* , при которой достигается совпадение резонансной длины волны ВИЛ с длиной волны максимального усиления активной области;
- 7) для проверки результатов следует найти минимум зависимости $I_{\text{th}}^{\text{cor}}$ от температуры и сравнить полученное значение T_l^* с величиной T_g^* .

Несмотря на то что данный подход требует дополнительного экспериментального исследования полосковых лазеров, он может быть успешно применен для оптимизации структур ВИЛ с целью минимизации порогового тока и получения высокой температурно-стабильной выходной мощности.

4. Заключение

В настоящей работе предложен и экспериментально апробирован способ определения величины расстройки спектра усиления активной области и резонансной длины волны ВИЛ. Для описания температурной зависимости порогового тока ВИЛ предложено выражение, учитывающее не только температурный рост порогового тока, обусловленный уменьшением усиления активной области с температурой и термическим выбросом носителей, но и влияние температурной зависимости величины расстройки. Показано, что определение расстройки

ВИЛ на основе длины волны в максимуме спектра электролюминесценции при малой плотности тока накачки дает некорректное значение температуры нулевой расстройки. Использование температурной зависимости длины волны максимума усиления активной области ВИЛ при заданной плотности тока позволяет корректно определить температурную зависимость расстройки. Полученная истинная температура нулевой расстройки T_g^* находится в хорошем соответствии со значением T_l^* минимума скорректированной зависимости порогового тока $I_{\text{th}}^{\text{cor}}(\Delta\lambda(T))$ ВИЛ от величины расстройки. Предложенный подход особенно актуален для структур ВИЛ с активной областью на основе квантовых точек, обладающих широким спектром усиления, форма и положение максимума которого существенно зависят от уровня накачки.

Работа была выполнена при поддержке Научной программы СПб НЦ РАН, Программы фундаментальных исследований президиума РАН „Квантовые наноструктуры“, РФФИ, проектов SANDiE (NMP4-CT-2004-500101) и Nanophotonics Project (MOEA, Taiwan).

Список литературы

- [1] C.W. Wilmsen, H. Temkin, L.A. Coldren. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Cambridge University Press, 1999).
- [2] J. Cheng, N.K. Duttan. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications* (Gordon and Breach Science Publishers, 2000).
- [3] M. Osinski, W. Nakwaski. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, **5**, 139 (1994).
- [4] M.S. Unlu, S. Strite. *J. Appl. Phys.*, **78**, 607 (1995).
- [5] X. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981).
- [6] G. Hasnain, K. Tai, L. Yang, Y.H. Wang, R.J. Fischer, J.D. Wynn, B. Weir, N.K. Dutta, A.Y. Cho. *IEEE J. Quant. Electron.*, **27**, 1377 (1991).
- [7] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov, N.A. Maleev. *Quantum dot lasers* (Oxford University Press, 2003).
- [8] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, D.A. Livshits, I.S. Tarasov, D.A. Bedarev, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, I.P. Soshnikov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.* **35**, 1845 (1999).
- [9] A. Bond, P.D. Dapkus, J.D. O'Brien. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 13 627 (1998).
- [10] С.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.М. Шерняков, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, В.В. Дюделев, Г.С. Соколовский, В.И. Кучинский, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Н.Н. Леденцов. *ФТП*, **40**, 633 (2006).
- [11] С.А. Блохин, А.Н. Смирнов, А.В. Сахаров, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, Д.А. Бедарев, Е.В. Никитина, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. *ФТП*, **39**, 782 (2005).
- [12] D.B. Young, J.W. Scott, F.H. Peters, M.G. Peters, M.L. Majewski, B.J. Thibeault, S.W. Corzine, L.A. Coldren. *IEEE J. Quant. Electron.*, **29**, 2013 (1993).

- [13] J.W. Scott, R.S. Geels, S.W. Corzine, L.A. Coldren. IEEE J. Quant. Electron., **29**, 1295 (1993).
- [14] A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, D.A. Livshits, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, N.A. Pihtin, I.S. Tarasov, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, J.S. Wang, L. Wie, G. Lin, J.Y. Chi, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Microelectronics J., **34**, 491 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

**Study of temperature dependence
of threshold characteristics
in semiconductor vertical-cavity
surface-emitting lasers based
on submonolayer InGaAs quantum dots**

*S.A. Blokhin, A.V. Sakharov, N.A. Maleev,
A.G. Kuzmenkov, I.I. Novikov, N.Yu. Gordeev,
Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov,
V.M. Ustinov, A.R. Kovsh*, S.S. Mikhlin*,
G. Lee[×], J.Y. Chi[×]*

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Science,
194021 St. Petersburg, Russia

* NL-Nanosemiconductors GmbH,
44227 Dortmund, Germany

[×] Industrial Technology Research Institute,
Chutung, Hsinchu, 310, Taiwan, Republic of China

Abstract The temperature dependence of threshold current for vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) based on submonolayer deposited InGaAs quantum dots was studied. The spectral misalignment between the lasing wavelength and the peak gain of active region (detuning) should be used in order to correctly describe the thermal characteristics of laser diodes. Expressions for the temperature dependence of the VCSEL threshold current, which take into account the drop in maximum gain with temperature and the influence of the temperature dependence of detuning, have been proposed.