

Инжекционные микродисковые лазеры спектрального диапазона 1.27 мкм

© Н.В. Крыжановская⁺, М.В. Максимов^{+,*}, С.А. Блохин^{*}, М.А. Бобров^{*,‡}, М.М. Кулагина^{*},
С.И. Трошков^{*}, Ю.М. Задиранов^{*}, А.А. Липовский^{+,‡}, Э.И. Моисеев⁺,
Ю.В. Кудашова⁺, Д.А. Лившиц[#], В.М. Устинов^{*}, А.Е. Жуков^{+,‡•}

⁺ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

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

[‡] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[#] Innolume GmbH, Dortmund, Germany

[•] Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук,
199034 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

(Получена 30 июня 2015 г. Принята к печати 8 июля 2015 г.)

Реализованы инжекционные микродисковые лазеры на подложках GaAs с минимальным диаметром 15 мкм и активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре без принудительного охлаждения. Длина волны генерации составила ~ 1.27 мкм, минимальный пороговый ток 1.6 мА. Удельное тепловое сопротивление оценено равным $5 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$.

1. Введение

Микродисковые и микрокольцевые лазеры перспективны для реализации систем оптической связи на плате [1]. Размеры таких оптических элементов могут составлять всего лишь единицы микрометров ввиду того, что в микрорезонаторах, обладающих осевой симметрией, вследствие полного внутреннего отражения света от боковых стенок резонатора достигается высокая добротность [2]. В отличие от вертикально-излучающих лазеров, с их помощью легко реализовать латеральный вывод излучения, например, в оптически связанный с микролазером магистральный волновод. Благодаря подавлению латерального растекания носителей заряда в структурах с квантовыми точками (КТ) [3,4], они активно используются в качестве активной области микродисковых лазеров [5].

Важным достоинством самоорганизующихся КТ InAs/InGaAs, формируемых на подложках GaAs, является возможность генерации на длине волны, близкой к 1.3 мкм, что соответствует прозрачности стандартного оптического волокна, кремния и кремний-германиевых планарных волноводов, а также проводящих тонких пленок пиролитического углерода [6] или графена [7], перспективных для создания гибких прозрачных контактов. Недавно нами были реализованы и представлены микролазеры на КТ спектрального диапазона 1.3 мкм, обладающие рекордно-малыми размерами: при оптической накачке лазерная генерация в них достигалась при 100°C вплоть до диаметра 2 мкм [8], а при комнатной температуре — до 1 мкм включительно [9]. В то же время инжекционные микродисковые КТ-лазеры уступают по

своим характеристикам КТ-микролазерам, работающим при оптической накачке. Наименьший размер инжекционного микродискового лазера, в котором генерация достигалась при комнатной температуре, остается равным 6.5 мкм [10]. При этом длина волны генерации составила 1.06 мкм, что ограничивает возможность использования подобных структур в системах оптической связи. В микролазерах диаметром 80 мкм с длиной волны излучения 1.23 мкм лазерная генерация наблюдалась вплоть до 50°C [11].

В настоящей работе нами показана возможность достижения низкопороговой генерации при электрической накачке на длине волны основного оптического перехода квантовых точек (~ 1.3 мкм) в работающих при комнатной температуре микродисковых лазерах диаметром до 15 мкм.

2. Эксперимент

Эпитаксиальная структура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs(100). Активная область представляет собой 10 рядов квантовых точек InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As [12], разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 35 нм и помещенных в волноводный слой GaAs. Максимум излучения основного перехода КТ находился при комнатной температуре на длине волны ~ 1.27 мкм. Общая толщина волновода с активной областью составляет 0.44 мкм. Эмиттерные слои Al_{0.25}Ga_{0.75}As толщиной около 2.2 мкм были легированы кремнием (n -слой) и углеродом (p -слой). Контактный слой p^+ -GaAs легирован до уровня 10^{20} cm^{-3} .

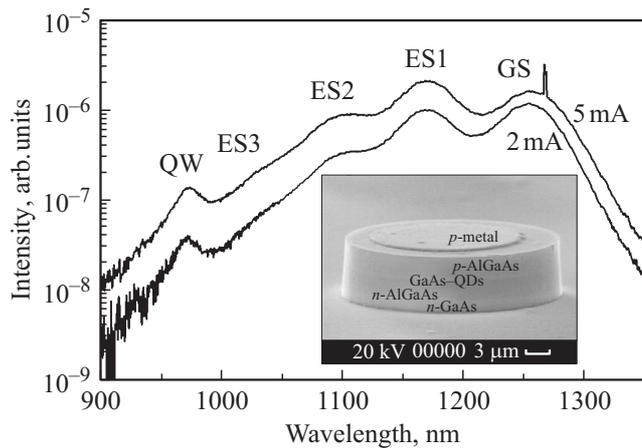


Рис. 1. Спектры электролюминесценции микролазера диаметром 27 мкм, записанные с низким спектральным разрешением. На вставке — микрофотография лазера.

Микродисковые резонаторы были сформированы с помощью плазмохимического травления глубоких мез цилиндрической формы. Глубина травления составила ~ 7 мкм, наклон вертикальной стенки не превышал 5° . Диаметр резонатора, измеренный в области залегания массива КТ, варьировался от 15 до 31 мкм. Верхние омические контакты к p^+ -GaAs были сформированы с помощью металлизации AgMn/NiAu и имели круглую форму. Нижний сплошной контакт к n^+ -подложке был сформирован с помощью металлизации AuGe/Ni/Au. На вставке к рис. 1 в качестве примера приведено полученное с помощью растрового электронного микроскопа изображение микролазера диаметром 27 мкм.

Микролазеры устанавливались n -контактом на медный теплоотвод без пайки и принудительного охлаждения. Измерения лазерных характеристик проводились в непрерывном режиме при комнатной температуре с помощью игольчатого микросонда, устанавливаемого на верхний металлический контакт исследуемого микролазера. Ток накачки изменялся в диапазоне 0–20 мА. Излучение собиралось с помощью оптоволоконной оконечной микролинзой, подводимой к периферии микролазера, регистрировалось с помощью спектроанализатора ANDO AQ-6315 А/В со спектральным разрешением ~ 0.1 нм.

3. Результаты и обсуждение

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых микролазеров являются типичными для полупроводниковых диодных p - i - n -структур — с напряжением открытия при прямом смещении $U_0 = 1.1$ – 1.15 В и последовательным сопротивлением R_S , масштабируемым пропорционально площади диода. Удельное последовательное сопротивление оценено равным 10^{-4} Ом \cdot см 2 .

На рис. 1 показаны спектры электролюминесценции структуры диаметром 27 мкм, записанные в широком

диапазоне длин волн с низким спектральным разрешением. При малых накачках спектр излучения имеет вид, характерный для спонтанного излучения самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs [12]: наиболее длинноволновый максимум (GS) соответствует основному оптическому переходу КТ, а серия более коротковолновых пиков излучения — возбужденным оптическим переходам КТ (ES1–ES3), а также квантовой ямы InGaAs (QW), покрывающей массив КТ. Характерная ширина наблюдаемых пиков спонтанного излучения составляет несколько десятков нанометров. С ростом тока накачки на длинноволновом склоне пика излучения GS возникает узкая (шириной ~ 1 нм при использованном спектральном разрешении) линия, соответствующая одной из мод шепчущей галереи (МШГ) микрорезонатора.

Более детально зависимость интенсивности МШГ от тока накачки была исследована с помощью спектров, снятых с высоким спектральным разрешением. Пример такого спектра, измеренный для микродискового лазера

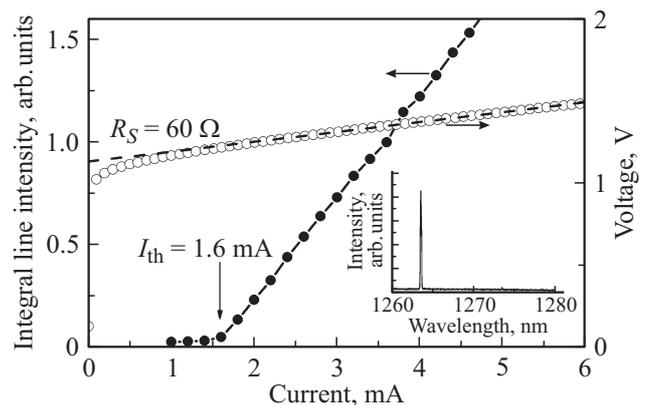


Рис. 2. Зависимости интегральной интенсивности доминантной моды и падения напряжения от тока накачки для микролазера диаметром 15 мкм. На вставке — спектр излучения при токе 1.8 мА.

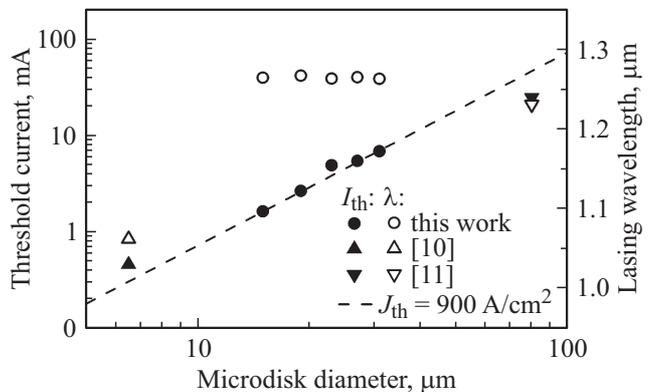


Рис. 3. Пороговый ток I_{th} и длина волны генерации λ в зависимости от диаметра для исследуемых микродисковых лазеров, а также данные [10,11]. Штриховая линия — расчет порогового тока для постоянной плотности тока 900 А/см 2 .

ра диаметром 15 мкм, приведен на вставке к рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности линии излучения МШГ от тока имеет характерный излом, соответствующий порогу лазерной генерации. Для данных, приведенных на рис. 2, пороговый ток оценен как $I_{th} = 1.6$ мА, что соответствует пороговой плотности тока $J_{th} = 905$ А/см². На рис. 2 также показана ВАХ этого лазера, из которой определены U_0 и R_S , равные 1.13 В и 60 Ом соответственно.

На рис. 3 обобщены данные по пороговому току I_{th} и длине волны лазерной генерации λ исследуемых микродисковых лазеров. Среднее значение пороговой плотности тока составило 0.9 кА/см², что хорошо согласуется с результатами, ранее сообщенными для микродисковых лазеров на КТ, работающих при комнатной температуре [10,11]. При этом представленные в настоящей работе микролазеры обладают наиболее длинноволновым лазерным излучением.

Исследование спектров генерации при накачках, заметно превышающих порог генерации, показало одновременное возбуждение нескольких лазерных мод

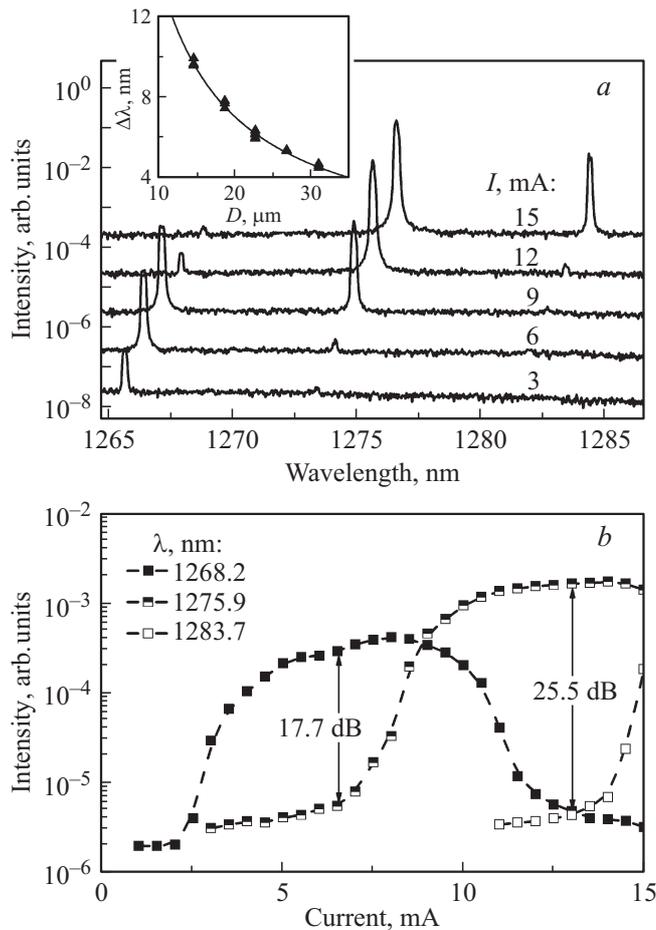


Рис. 4. Спектры лазерной генерации при различных токах (а) и зависимости интенсивности излучения отдельных мод от тока (б) для микролазера диаметром 19 мкм. а: на вставке — зависимость межмодового интервала от диаметра, линия — расчет для $N_{eff} = 3.64$ и $\lambda = 1265$ нм.

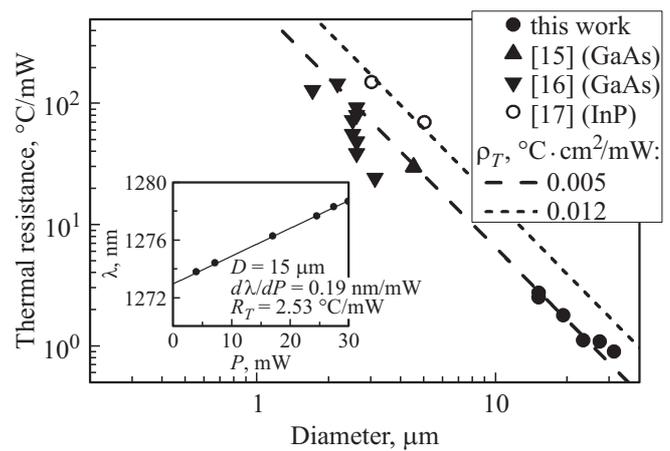


Рис. 5. Зависимость теплового сопротивления от диаметра для исследуемых микролазеров, а также данные [15–17]. Линии — аппроксимация для постоянного удельного теплового сопротивления. На вставке: зависимость положения линии генерации от тока для микролазера диаметром 15 мкм.

(рис. 4, а). Приведенная на вставке к рис. 4, а зависимость межмодового интервала $\Delta\lambda$ от диаметра микролазера D превосходно согласуется с известной формулой [13] $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\pi D N_{eff})$ для МШГ цилиндрического резонатора. Эффективный групповой индекс N_{eff} оценен равным 3.64, в хорошем согласии с результатом расчета для использованной слоистой структуры.

Вблизи порога генерации излучение носит одномодовый характер. С ростом накачки интенсивность моды растет, однако при некотором токе происходит возбуждение более длинноволновой МШГ, а интенсивность более коротковолновой МШГ начинает спадать (рис. 4, б). При еще большем токе наблюдается возгорание следующей еще более длинноволновой моды. Данный эффект, по-видимому, обусловлен уменьшением усиления на длине волны МШГ, участвующей в лазерной генерации. В приведенном на рисунке примере для микролазера диаметром 19 мкм пороги генерации мод с длинами волн вблизи 1268, 1276 и 1284 нм составляют соответственно 2.6, 7.5 и 13 мА. Во всем диапазоне наблюдения, ширина линии лазерной моды остается приблизительно постоянной ~ 0.1 нм.

Несмотря на многомодовый характер излучения, могут быть подобраны такие режимы лазерной генерации, для которых интенсивность доминантной моды существенно превосходит интенсивность остальных мод, что должно существенно облегчить оптическую передачу данных на выделенной длине волны. Например, для данных рис. 4, б коэффициент подавления боковых мод при токе ~ 13 мА составляет > 25 дБ.

Длинноволновый сдвиг $d\lambda/dT$ линии излучения той или иной МШГ с ростом температуры T обусловлен изменением показателей преломления слоев лазерной структуры. Для микродисковых лазеров исследуемого типа в температурном диапазоне 20–80 °С

$d\lambda/dT = (0.075 \pm 0.005) \text{ нм}/^\circ\text{C}$ [14]. При увеличении тока накачки происходит саморазогрев активной области, т.е. увеличение ее температуры по отношению к температуре окружающей среды. На вставке к рис. 5 показана зависимость длины волны λ одной из МШГ от рассеиваемой электрической мощности P для микродиска диаметром 15 мкм. Наклон $d\lambda/dP$ составил в данном случае 0.19 нм/мВт. Эти данные могут быть использованы для определения теплового сопротивления микролазеров $R_T = (\lambda/dP)/(d\lambda/dT)$. В данном случае оно оценено равным 2.5°С/мВт. Таким образом, при мощности накачки 20 мВт перегрев активной области этого микродискового лазера, обладающего среди исследованных структур наименьшим диаметром и соответственно наибольшим тепловым сопротивлением, составит $\sim 50^\circ\text{C}$.

Рис. 5 обобщает данные по тепловому сопротивлению, оцененному для исследуемых микролазеров различного диаметра. Как видно, тепловое сопротивление таких микролазеров масштабируется обратно пропорционально квадрату диаметра активной области; удельное тепловое сопротивление составляет $\rho_T \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$. Полученные в настоящей работе значения теплового сопротивления хорошо согласуются с известными из литературы экспериментальными данными для микродисков с квантовыми точками на подложке GaAs [15,16]. В то же время значение удельного теплового сопротивления микродисков на основе GaInAsP на подложках InP [17] оказывается примерно в 2.4 раза выше.

4. Заключение

Исследованы микродисковые лазеры диаметром 15–31 мкм с квантовыми точками в активной области, работающие при комнатной температуре и инжекционной накачке. Лазерная генерация происходит на одной или нескольких модах шепчущей галереи микрорезонатора, длина волны которых лежит в полосе основного оптического перехода КТ около 1.27 мкм. Показана возможность достижения коэффициента подавления боковых мод 25 дБ. Пороговая плотность тока лазеров не зависит от их диаметра и составила около 0.9 кА/см². Удельное тепловое сопротивление оценено равным $5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$, что более чем в 2 раза ниже значения для микролазеров на подложках InP.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-32-20238, 13-02-12032 офи-м), а также Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН.

Список литературы

[1] K.J. Vahala. *Nature*, **424**, 839 (2003).
 [2] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 289 (1992).

[3] M.V. Maximov, B.V. Volovik, C.M. Sotomayor Torres, E.M. Ramushina, V.I. Skopina, E.M. Tanklevskaya, S.A. Gurevich, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Phys. Status Solidi A*, **188**, 955 (2001).
 [4] D. Ouyang, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, L53 (2003).
 [5] H. Cao, J.Y. Xu, W.H. Xiang, Y. Ma, S.-H. Chang, S.T. Ho, G.S. Solomon. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3519 (2000).
 [6] T. Kaplas, Yu. Svirko. *J. Nanophoton.*, **6**, 061 703 (2012).
 [7] Y.-H. Kim, S.-H. Kwon, J.M. Lee, M.-S. Hwang, J.-H. Kang, W.I. Park, H.-G. Park. *Nature Commun.*, **3**, 1123 (2012).
 [8] M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.M. Nadtochiy, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.A. Bogdanov, Z.F. Sadrieva, A.E. Zhukov, A.A. Lipovskii, D.V. Karpov, J. Laukkanen, J. Tommila. *Nanoscale Res. Lett.*, **9**, 657 (2014).
 [9] N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.M. Nadtochiy, Yu.V. Kudashova, A.A. Lipovskii, M.M. Kulagina, S.I. Troshkov. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, in print (2015).
 [10] M.-H. Mao, H.-C. Chien, J.-Z. Hong, C.-Y. Cheng. *Opt. Express*, **19**, 14145 (2011).
 [11] M. Munsch, J. Claudon, N.S. Malik, K. Gilbert, P. Grosse, J.-M. Gerard, F. Albert, F. Langer, T. Schlereth, M.M. Pieczarka, S. Hofling, M. Kamp, A. Forchel, S. Reitzenstein. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 031 111 (2012).
 [12] A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, N.A. Maleev, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 575 (1999).
 [13] М.И. Городецкий. *Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью* (М., Физматлит, 2011).
 [14] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, M.V. Maximov, A.A. Lipovskii, I.S. Mukhin, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.V. Savel'ev, A.A. Bogdanov, D.V. Karpov, J. Laukkanen, J. Tommila, D. Livshits. *Int. Nano-Optoelectronics Workshop, NOW* (St. Petersburg & Luge, Russia, 2014).
 [15] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, T. Nakaoka, Y. Arakawa. *Opt. Express*, **13**, 1615 (2005).
 [16] А.Е. Жуков, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.А. Липовский, А.В. Савельев, И.И. Шостак, Э.И. Моисеев, Ю.В. Кудашова, М.М. Кулагина, С.И. Трошков. *ФТП*, **49** (5), 688 (2015).
 [17] M. Fujita, A. Sakai, T. Baba. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **5**, 673 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Injection microdisk lasers of 1.27 μm spectral range

N.V. Kryzhanovskaya⁺, *M.V. Maximov*^{+,*},
S.A. Blokhin^{*}, *M.A. Bobrov*^{*,‡}, *M.M. Kulagina*^{*},
S.I. Troshkov^{*}, *Yu.M. Zadiranov*^{*}, *A.A. Lipovskii*^{+,‡},
E.I. Moiseev⁺, *Yu.V. Kudashova*⁺, *D.A. Livshits*[#],
V.M. Ustinov^{*}, *A.E. Zhukov*^{+,‡,•}

⁺ Saint Petersburg National Research
Academic University,
Russian Academy of Sciences,
195220 St. Petersburg, Russia

^{*} Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

[‡] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

[#] Innolume GmbH, Dortmund, Germany

[•] St. Petersburg Scientific Center,
Russian Academy of Sciences,
199034 St. Petersburg, Russia

Abstract Injection microdisks lasers on GaAs substrates with minimal diameter of 15 μm having an active region based on InAs/InGaAs quantum dots are demonstrated; the laser operate in continuous wave regime at room temperature without external cooling. Lasing wavelength is around 1.27 μm , minimal threshold current is 1.6 mA. Specific thermal impedance is estimated to be $5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$.