

## Лазеры на основе InAsSbP-двойных гетероструктур для спектрального диапазона 2.7–3.0 мкм ( $T = 77$ К)

© Т.Н. Данилова, А.П. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 5 июня 1997 г. Принята к печати 10 июня 1997 г.)

Лазеры, излучающие в спектральном диапазоне 2.7–3.0 мкм, созданы методом жидкофазной эпитаксии на основе InAsSbP-двойных гетероструктур с разным содержанием фосфора в активной и широкозонных областях. Лазеры имеют при 77 К пороговую плотность тока  $\sim 0.8$  кА/см<sup>2</sup> и работают в импульсном режиме до  $\sim 124$  К с предельной пороговой плотностью тока 10–12 кА/см<sup>2</sup>. Лазеры имеют низкое последовательное сопротивление  $\sim 0.45$  Ом.

1. Источники излучения в спектральной области 2.7–3.0 мкм перспективны, в частности, для целей влагометрии и газового анализа, так как в этой спектральной области лежат сильные линии поглощения таких молекул, как H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и др.

Создание лазеров, излучающих в области длин волн 2.7–3.0 мкм, наталкивается на определенные технологические трудности. Так, методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на основе GaInAsSb/AlGaAsSb-двойных гетероструктур (ДГС) с активной областью состава Ga<sub>0.745</sub>In<sub>0.255</sub>As<sub>0.230</sub>Sb<sub>0.770</sub> были созданы лазеры, излучающие в импульсном режиме при комнатной температуре на длине волны 2.5 мкм [1]. Более длинноволновое излучение получить не удалось из-за приближения к границе несмешиваемости твердых растворов GaSb–InAs [2]. Однако методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МЛЭ) созданы лазеры, излучающие при комнатной температуре длину волны 2.78 мкм [3]. Лазеры имеют активную область, содержащую 4 квантовых ямы с составом материала In<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As<sub>0.16</sub>Sb<sub>0.84</sub>, барьеры между ними с составом материала Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As<sub>0.02</sub>Sb<sub>0.98</sub> и ограничительные области состава Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As<sub>0.08</sub>Sb<sub>0.92</sub>, и работают в импульсном режиме до температуры 60°С. В непрерывном режиме лазеры при комнатной температуре не работают. Существенный недостаток этих лазеров — большое напряжение питания из-за высокого остаточного сопротивления. При постоянном токе 0.1 А напряжение смещения в прямом направлении составляет 4.8 В при 78 К и 2.2 В при 300 К.

Были попытки создания диодных лазеров методом ЖФЭ на основе твердого раствора InAsSbP<sub>x</sub>, изопериодного с подложкой InAs, с разным содержанием фосфора в активной и ограничительных областях [4,5]. Однако малое содержание фосфора в ограничительных областях,  $x = 0.1$  в работе [4] и  $x = 0.2$  в работе [5], приводило к тому, что лазеры, излучающие на длине волны 3 мкм [4], работали только в импульсном режиме при 77 К с пороговой плотностью тока 3 кА/см<sup>2</sup> и максимальной рабочей температурой 145 К. Лазеры, излучающие на длине волны 2.5–2.7 мкм [5], работали только в импульсном режиме до температуры 55 К с пороговой плотностью тока  $\sim 29$  кА/см<sup>2</sup>.

В нашей предыдущей работе [6] сообщалось о создании диодных лазеров методом ЖФЭ на основе твердого раствора InAsSbP<sub>x</sub>, изопериодного с подложкой InAs, с разным содержанием фосфора в широкозонных и активной областях. В широкозонных областях  $x = 0.35$ , а в узкозонной области  $x$  варьировался от 0.02 до 0.10. Толщина активной области в них составляла 0.5 мкм. Были получены лазеры с длиной волны 2.7–3 мкм, работающие в импульсном режиме при температуре 77 К с пороговым током 400 мА и пороговой плотностью тока  $\sim 5.7$  кА/см<sup>2</sup>.

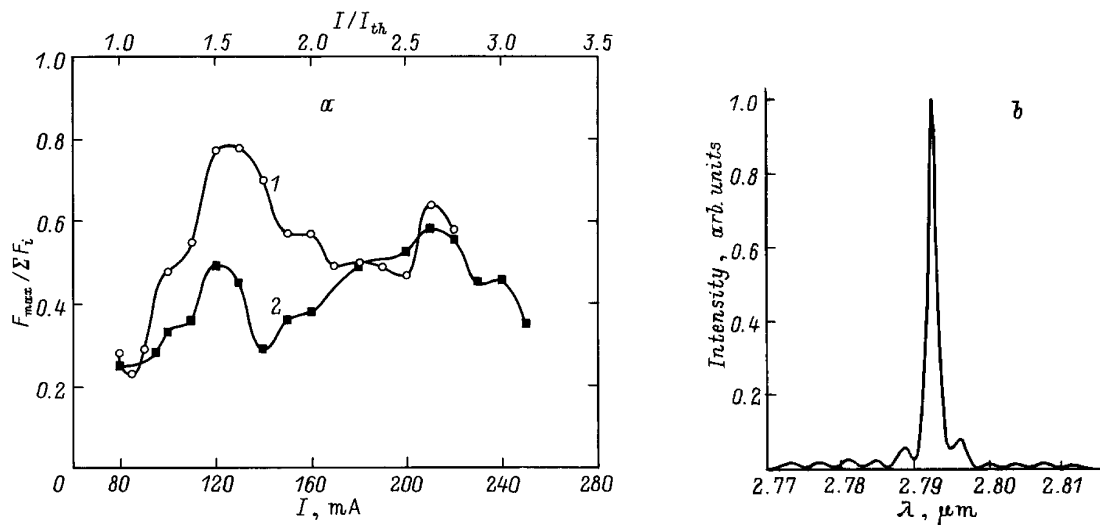
Данная работа является продолжением начатых нами исследований по разработке лазеров для спектрального диапазона 2.7–3 мкм и посвящена созданию лазеров с низкими пороговыми токами.

2. Лазеры изготавливались методом ЖФЭ и представляли собой двойную гетероструктуру на основе твердого раствора InAsSbP<sub>x</sub> в активной и широкозонных областях. В активной области содержание фосфора составляло  $x \cong 0.08 \div 0.12$ , в ограничительных областях  $x \cong 0.25 \div 0.28$ . По расчетным данным ширины запрещенных зон  $E_g$  активной области варьировалось в интервале 0.42 ÷ 0.47 эВ, а в широкозонных областях — в интервале 0.55 ÷ 0.58 эВ при 77 К. Структуры имели на границах узкозонной и широкозонной областей гетеропереход II типа с разрывами в зоне проводимости  $\sim 100$  мэВ и в валентной зоне  $\sim 15$  мэВ.

Активная область специально не легировалась и была  $n$ -типа с концентрацией электронов  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Ограничительная  $P$ -область легировалась Zn и имела концентрацию дырок  $\sim (1-2) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Ограничительная  $N$ -область легировалась Sn и имела концентрацию электронов  $\sim (5-7) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

Толщины активной области и ограничительных областей были по  $\sim 1.5$  мкм. Расчетная разность показателей преломления активной области и ограничительных областей составляла 0.03 ÷ 0.04 (при  $T = 300$  К).

Из лазерных эпитаксиальных структур методом фотолитографии изготавливались мезаполосковые структуры с шириной полоска  $\sim 25$  мкм. Лазеры с длиной резонатора 225 ÷ 300 мкм изготавливались посредством скальвания.



**Рис. 1.** Спектральные характеристики лазеров. Зависимость отношения интенсивности максимальной моды к сумме интенсивностей всех мод  $F_{\max}/\Sigma F_i$  от тока  $I$  (а) для лазера S-197 № 2 (1) и для лазера S-197 № 1 (2). Спектр когерентного излучения (лазер S-197 № 2) в максимально одномодовом режиме (б).

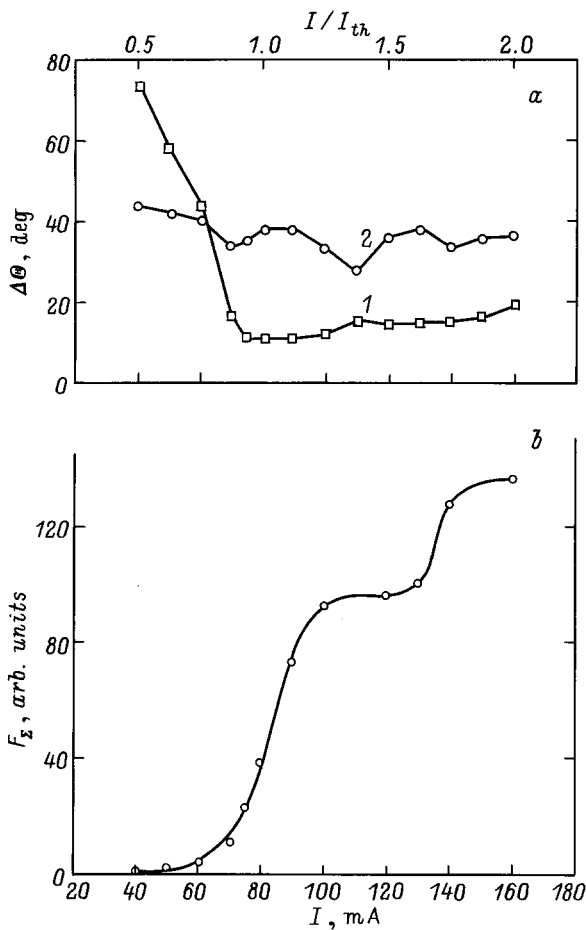
Исследовались спектры излучения, диаграммы, направленности и интегральная интенсивность излучения лазеров в квазинепрерывном режиме при питании их прямоугольными импульсами тока типа меандр с частотой следования 80 Гц при температуре жидкого азота. Температурная зависимость пороговой плотности тока определялась при питании лазеров импульсами тока длительностью 100 нс и частотой следования  $10^5$  Гц.

3. Созданные лазеры имели пороговые токи  $I_{th} = 70 \div 80$  мА при температуре жидкого азота, что соответствовало пороговой плотности тока  $\sim 0.8$  кА/см<sup>2</sup>. Лазеры имеют низкое напряжение питания. При прямом токе через лазерный диод  $I = 0.1$  А падение напряжения  $U = 0.67$  В и остаточное сопротивление составляет 0.45 Ом.

Лазеры излучали в спектральной области 2.7–3 мкм, длина волны излучения зависела от состава активной области. Излучение лазеров имело достаточно хорошие когерентные свойства. Исследовались модовый состав и пространственное распределение излучения. Модовый состав спектра излучения зависел от тока накачки. Межмодовое расстояние имело величину 35–40 Å. Одномодовый режим генерации наблюдался в определенном интервале токов. Численная оценка доли интенсивности излучения преимущественной моды  $F_{\max}$  в суммарной интенсивности излучения всех мод  $\Sigma F_i$  в спектре в зависимости от тока представлена на рис. 1, а для двух лазеров. Как видно, эта зависимость у обоих лазеров имеет два максимума при токах  $\sim 1.5I_{th}$  и  $\sim 2.6I_{th}$ , причем у одного из лазеров (S-197 № 2) максимум, соответствующий меньшим токам, больше (кривая 1), а у другого лазера (S-197 № 1) максимум, соответствующий меньшим токам, меньше (кривая 2). Самое большое значение  $F_{\max}/\Sigma F_i \cong 0.8$ . У лазера, соответствующего кривой 1, оба максимума зависимости  $F_{\max}/\Sigma F_i(I)$

соответствуют одной и той же преимущественной моде, а при токах между максимумами зависимости наблюдался перескок преимущества на соседнюю более длинноволновую моду. У лазера, имеющего зависимость  $F_{\max}/\Sigma F_i(I)$ , обозначенную кривой 2, разным максимумам соответствуют разные преимущественные моды, отстоящие друг от друга на два межмодовых интервала, причем промежуточные между ними моды имели небольшое преимущество при токах вблизи порогового. На рис. 1, б представлен спектр когерентного излучения (лазер S-197 № 2) в максимально одномодовом режиме с длиной волны преимущественной моды  $\lambda \approx 2.792$  мкм.

Исследование пространственного распределения излучения лазеров показало, что оно соответствует одной продольной моде. Зависимость пространственного распределения и интенсивности интегрального излучения от тока представлены на рис. 2 (лазер S-197 № 1). Пространственное распределение характеризуется полшириной диаграммы направленности  $\Delta\Theta$ , что соответствует ширине диаграммы на половине высоты максимальной интенсивности. Как видно, пространственная мода (рис. 2, а) в плоскости  $p$ - $n$ -перехода (кривая 1)  $\Delta\Theta$  имеет минимальное значение  $\sim 11^\circ$  при токах вблизи порогового. При токах больше  $1.25I_{th}$   $\Delta\Theta$  увеличивается с током и достигает при  $I \cong 2I_{th}$  величины  $19.5^\circ$ . В плоскости, перпендикулярной плоскости  $p$ - $n$ -перехода (рис. 2, а, кривая 2), в среднем  $\Delta\Theta \cong 40^\circ$ . При некоторых токах, соответствующих перескокам мод на другую преимущественную в спектре излучения, на зависимости  $\Delta\Theta(I)$  имеются небольшие минимумы. Этим минимумам соответствуют перегибы на зависимости интегрального излучения  $F_\Sigma$  от тока (рис. 2, б). Несовпадение токов для указанных характерных точек зависимостей находится в пределах 10% от тока, что достаточно хорошо для независимых измерений.



**Рис. 2.** Зависимость от тока смещения  $I$  ширины диаграммы направленности на половине высоты максимальной интенсивности  $\Delta\theta$  (а) в плоскости  $p-n$ -перехода ( $I$ ), в плоскости, перпендикулярной плоскости  $p-n$ -перехода (2), и интенсивности интегрального излучения  $F_{\Sigma}$  (b) для лазера S-197 № 1.

С увеличением температуры происходит резкое возрастание пороговой плотности тока (рис. 3) с характеристической температурой  $T_0 \sim 27$  К в интервале температур 80–100 К и  $T_0 \sim 19$  К в интервале температур 100–120 К. Затем пороговая плотность тока возрастает еще быстрее, и генерация прекращается при температуре  $\sim 124$  К и плотностях тока 10–12 кА/см<sup>2</sup>.

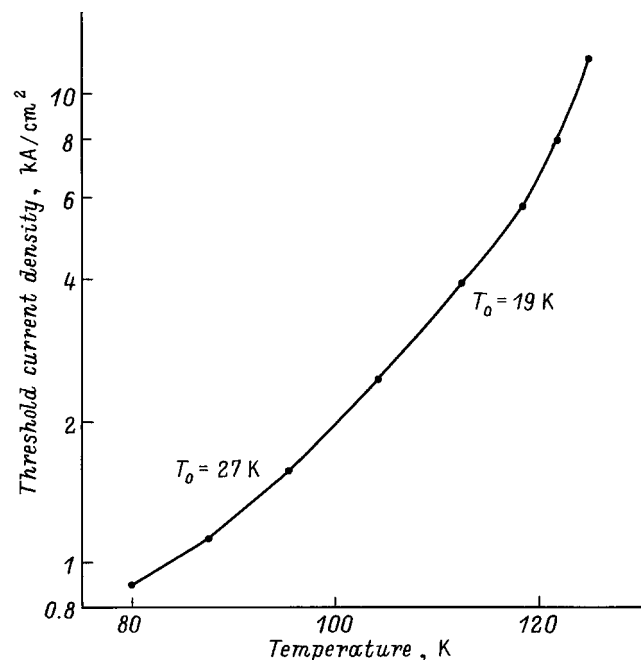
4. Обсудим полученные результаты. Лазеры, представленные в данной работе, имеют пороговые токи и пороговые плотности токов приблизительно в 5 раз меньше, чем аналогичные лазеры, о которых сообщалось в предыдущей работе [6]. Пороговые плотности токов созданных лазеров при температуре 77 К соответствуют средним величинам пороговых токов наших лазеров на основе InAsSb/InAsSbP, излучающих в спектральной области 3.2–3.9 мкм, но имеют более резкую температурную зависимость. Когерентные свойства излучения лазеров, о которых сообщается в данной работе, исследованные при 77 К, также соответствуют когерентным свойствам средних наших лазеров, излучающих в спектральной области 3.2–3.9 мкм. Так, в спектрах созданных лазеров во всем

исследованном интервале токов от  $I_{th}$  до  $3I_{th}$  преимущественной оказывается одна из двух или одна из трех соседних мод, причем отношение  $F_{max}/\Sigma F_i$  достигает величины 0.8 (рис. 1). Пространственное распределение излучения в плоскости  $p-n$ -перехода происходит в одной продольной моде.

Лучших параметров лазеров, излучающих в спектральной области 3.2–3.9 мкм при 77 К [7], данные лазеры не достигают. Одной из причин этого может быть то, что разность показателей преломления между узкозонной и широкозонной областями  $\Delta n$ , определяющая оптическое ограничение, у них примерно в 2 раза меньше. Малым  $\Delta n$  может быть объяснен тот факт, что при перескоке преимущественной моды в другое положение происходит небольшое пространственное расширение потока излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости  $p-n$ -перехода. Расширение потока излучения приводит к сужению диаграммы направленности из-за уменьшения дифракционных потерь. Проникновение потока излучения в широкозонные области сопровождается уменьшением интегральной интенсивности излучения (рис. 2, b) вследствие увеличения поглощения на свободных носителях.

Повышение температуры приводит к резкому возрастанию пороговой плотности тока исследованных лазеров и срыву генерации при низкой максимальной рабочей температуре и при сравнительно низких плотностях тока (рис. 3). Рассмотрим возможные причины такой температурной зависимости пороговой плотности тока.

Исследуемые лазеры были созданы на основе гетероструктур II типа. Согласно теории рекомбинации неравновесных носителей в гетероструктуре II типа [8], процессы оже-рекомбинации в таких структурах эф-



**Рис. 3.** Зависимость плотности порогового тока от температуры.

фактивно подавляются, что должно приводить к слабой температурной зависимости пороговой плотности тока. По этой теории при определенных параметрах гетероструктуры (отношение  $\Delta E_v/\Delta E_c \approx 3$ ) скорость оже-рекомбинации имеет минимум. У лазеров, созданных в настоящей работе,  $\Delta E_v = 15$  мэВ,  $\Delta E_c = 100$  мэВ,  $\Delta E_v/\Delta E_c = 0.15$ . Таким образом, энергетическая диаграмма данных лазеров не позволяет использовать преимущества гетероструктуры II типа в смысле подавления процессов оже-рекомбинации. Кроме того, очень маленький разрыв в валентной зоне (15 мэВ), сравнимый с  $kT$ , может послужить причиной того, что уже при небольших температурах и небольших плотностях тока происходит срыв генерации лазерного излучения из-за исчезновения электронного ограничения для дырок.

Другой причиной низкой максимальной рабочей температуры при достаточно низких предельных пороговых токах может быть срыв генерации лазерного излучения из-за исчезновения оптического ограничения с повышением температуры. Быстрый рост пороговой плотности тока с температурой приводит к увеличению концентрации свободных носителей  $N$  в активной области, что вызывает уменьшение показателя преломления в ней [9] и уменьшение вследствие этого оптического ограничения. Несмотря на то что с повышением температуры сам показатель преломления увеличивается и для полупроводников  $A^{III}B^V$  изменение показателя преломления с изменением концентрации носителей имеет обратную зависимость от температуры  $\delta = (dn/dN) \sim -(1/T)$  [10], оценки показывают, что для гетероструктуры на основе  $InAsSbP_x$  с разным содержанием фосфора  $-dn/dN$  может привести к исчезновению оптического ограничения при достаточно низких температурах.

Отметим также, что чем толще активная область, тем меньше излучение проникает в ограничительные слои и подложку и меньше поглощается на свободных носителях. Исследуемые лазеры имеют значительно лучшие параметры, чем те, о которых сообщалось в работе [6], по-видимому, из-за большей в 3 раза толщины активной области.

В результате показано, что на основе  $InAsSbP_x$ -гетероструктур с разным содержанием фосфора в активной и широкозонной областях созданы методом ЖФЭ лазеры, излучающие в области 2.7–3.0 мкм, имеющие при 77 К пороговые плотности тока  $\sim 0.8$  кА/см<sup>2</sup>, а при максимальной рабочей температуре  $\sim 124$  К пороговые плотности тока  $\sim 10$ –12 кА/см<sup>2</sup>. Лазеры работают в некотором интервале токов в одномодовом режиме и имеют пространственное распределение в виде одной продольной моды. Положительным качеством лазеров является их малое последовательное сопротивление  $\sim 0.45$  Ом. Нужно заметить, что конструкция лазеров может быть оптимизирована в зависимости от целей практического применения. Исследуемые в данной работе лазеры имеют ширину полоска  $\sim 25$  мкм. Для улучшения когерентных свойств лазера ширина полоска должна быть уменьшена [7]. Для получения меньших плотностей тока

ширина и длина полоска должны быть увеличены. При этом можно получить и несколько большую предельную температуру [11].

Однако для значительного повышения максимальной рабочей температуры необходимо использовать в широкозонных областях твердые растворы с большей шириной запрещенной зоны, гетеропереходы, осуществляющие электронное ограничение, должны быть II типа с возможно большим разрывом в валентной зоне.

Работа поддержана грантом Европейского сообщества INCO-Copernicus.

## Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, Е.А. Гребенщикова, Б.Е. Джуртанов, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **14**, 1839 (1988).
- [2] А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.М. Литвак, А.А. Попов, Н.А. Чарыков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **16**, 33 (1990).
- [3] H. Lee, P.K. York, R.J. Monna, R.U. Martinelli, D.Z. Garbuzov, S.Y. Narayan, J.C. Connolly. Appl. Phys. Lett., **66**, 1942 (1995).
- [4] N. Kobayashi, Y. Horikoshi. Jpn. J. Appl., **19**, 4641 (1990).
- [5] S. Akiba, Y. Matsushima, T. Iketani, M. Usami. Electron Lett., **24**, 1069 (1988).
- [6] Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, И.Н. Тимченко, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **20**, 87 (1994).
- [7] Т.Н. Данилова, А.П. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **31**, (1997).
- [8] Г.Г. Зегря, А.Д. Андреев. ЖЭТФ, **109**, 615 (1996).
- [9] P.P. Paskov. Sol. St. Commun., **82**, 739 (1992).
- [10] П.Г. Елисеев, А.П. Богатов. Тр. ФИАН, **166**, 15 (1986).
- [11] Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 1265 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

## InAsSbP double heterostructure laser for 2.7–3.0 $\mu\text{m}$ spectral region ( $T = 77$ K)

T.N. Danilova, A.P. Danilova, O.G. Ershov, A.N. Imenkov, M.V. Stepanov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev

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

**Abstract** Lasers emitting in the spectral range of 2.7–3.0  $\mu\text{m}$  were produced by liquid phase epitaxy on the base of InAsSbP double heterostructure with different composition of phosphorus in the active and confinement layers. The threshold current densities of these lasers at 77 K were  $\sim 0.8$  кА/см<sup>2</sup>. The lasers operated pulsed up to  $\sim 124$  K with the limit threshold current density 10–12 кА/см<sup>2</sup>. The series resistance of the lasers was as low as  $\sim 0.45\Omega$ .

Phone: (812) 247 9956

Fax: (812) 247 0006

E-mail: yak@iroptl.ioffe.rssi.ru