

07;12

## Охлаждение лазерных диодных сборок конструкции Silver Bullet

© И.В. Глухих,<sup>1</sup> С.С. Поликарпов,<sup>1</sup> С.В. Фролов,<sup>1</sup> А.С. Волков,<sup>2</sup> В.В. Привезенцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт электрофизический аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: polikarp@mit.niefa.spb.su

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 249033 Обнинск, Россия

(Поступило в Редакцию 15 апреля 2009 г.)

Рассмотрена эффективность применения микроканальных структур в виде микрооробрения в медных теплообменниках, предназначенных для охлаждения полупроводниковых модулей накачки мощных твердотельных лазеров. На основе проведенных расчетов разработаны эффективные теплообменники и изготовлены модули накачки с непрерывной мощностью излучения 760 W.

### Введение

Производство мощных твердотельных лазеров нового поколения, прежде всего, связано с решением проблемы эффективности накачки лазерных кристаллов. Современный подход к этой проблеме основывается на использовании охлаждаемых водой модулей накачки на основе сборок мощных непрерывных или импульсных лазерных диодных линеек. Вне зависимости от различий в способах компоновки лазерных линеек схема модуля конструктивно включает две части: излучающую, которая позиционируется с минимальным зазором у трубки-отражателя, и теплоотводящую.

Сборки лазерных диодных линеек конструкции Silver Bullet (недавно появилась новая модификация Golden Bullet) американской компании NG Cutting Edge Optronics помимо высоких эксплуатационных характеристик выгодно отличаются компактностью и возможностью их последовательного электрического соединения, в силу чего они „идеально“ подходят для разработки модулей накачки. Сборки содержат от одной до трех линеек (рис. 1) и способны инжектировать до 90 W мощности лазерного излучения в непрерывном режиме и до 600 W — в импульсном (при скважности менее 10%). Это означает, что при стандартном КПД  $\sim 40\%$  теплообменник должен отводить от сборки тепловые потоки плотностью  $\sim 2 \text{ MW/m}^2$ .

Достоинством конструкции Silver Bullet является также то, что линейки впаяны между медными блоками, вследствие чего плотность теплового потока под диодами ниже, чем в варианте пайки линейки одной стороной на теплообменник. Для более эффективного отвода выделяемого в сборках тепла сборки напаиваются на поверхности теплообменника с минимальной толщиной низкотемпературного припоя.

Чтобы обеспечить требуемый температурный режим диодов, необходимо иметь эффективные теплообменники с низким термическим сопротивлением, которое в основном определяется интенсивностью теплообме-

на на границе „стенка-вода“. Характеристики сборок Silver Bullet даются фирмой-изготовителем для температуры поверхности теплообменников  $25^\circ\text{C}$ . Если температура охлаждающей воды, например, находится на уровне  $15^\circ\text{C}$ , то перепад, обусловленный термическим сопротивлением теплообменника, не должен превышать  $10^\circ\text{C}$ . Здесь надо иметь в виду, что понижение температуры воды для компенсации термического перепада, вызванного значительным термическим сопротивлением, может привести при определенных погодных условиях к ситуации, когда температура диодов при выключении тока окажется ниже точки росы. Диоды могут покрыться водяной пленкой и выйти из строя. Поэтому желательно для безопасной работы снижать термосопротивление теплообменника.

В качестве охлаждающей жидкости в теплообменнике обычно используется дистиллированная вода с ингибиторными добавками (или 50%-ная смесь воды с этиленгликолем), которая протекает в целевом канале под лазерными сборками (рис. 2). Квантроны с диодной накачкой включают нечетное число модулей накачки (3 или 5), что обеспечивает более однородную прокачку активного элемента. При этом число сборок Silver Bullet в модуле не ограничено и зависит от длины активного кристалла.

Для достижения максимальной эффективности теплообмена целевой канал выполняется в виде микроканаль-

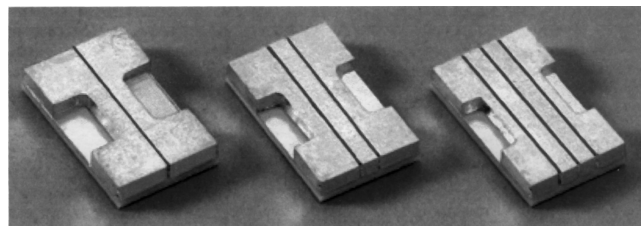


Рис. 1. Лазерные диодные линейки Silver Bullet.

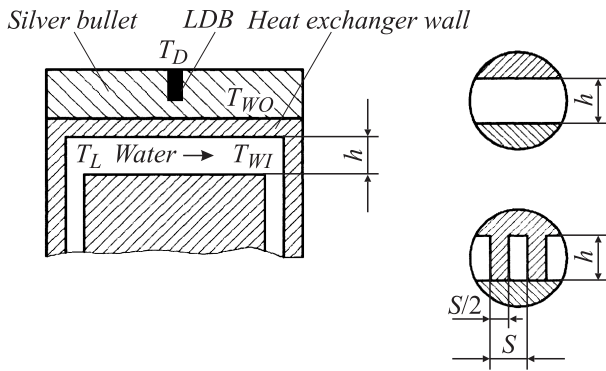


Рис. 2. Охлаждение сборки Silver Bullet.

ной пористой структуры с диаметром пор в несколько десятков микрон [1].

Однако вследствие высокого гидравлического сопротивления такой структуры для циркуляции через нее требуемого объема охлаждающей жидкости необходим значительный перепад давления, обычно не менее 3–4 atm. Кроме того, существует опасность закупорки пор микрочастицами, поэтому воду необходимо тщательно фильтровать.

Альтернативным решением является применение в канале охлаждения микроорезрения, выполненного в медных теплообменниках механическим способом [2] или в кремниевых теплообменниках химическим травлением [3]. Для изготовления микроорезрения с малым шагом, обеспечивающим высокую интенсивность теплообмена, применяют технологию пайки гофрированной медной фольги [4]. Структуры с микроорезрением обладают меньшей эффективностью теплообмена, чем пористые структуры, однако, имея значительно меньшее гидравлическое сопротивление, не требуют насосов высокого давления (достаточно насоса центробежного типа). Кроме того, достаточна лишь грубая фильтрация воды (50–100 μm). Все это существенно упрощает и удешевляет систему охлаждения лазера в тех случаях, когда микроорезрение способно отвести требуемое количество тепла от сборок.

Цель настоящей работы — рассмотреть эффективность применения микроканальных структур с микроорезрением в теплообменниках, предназначенных для охлаждения лазерныхборок Silver Bullet со средней мощностью излучения 40 W.

## Методика расчета

Рассматриваются микроканальные структуры, в которых толщина ребра  $\delta_F$  равна ширине межреберного канала  $\delta_L$ . Аппроксимационный расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при ламинарном течении жидкости в межреберном пространстве в случае, когда высота ребра  $h$  заметно превышает ширину межреберного кана-

ла  $\delta_L$ , может быть проведен по соотношениям [5]:

$$Nu = 1.85 \left( Pe \frac{2\delta_L}{x} \right)^{1/3} \quad \text{при} \quad Pe \frac{2\delta_L}{x} \geq 70, \quad (1)$$

$$Nu = 7.5 \quad \text{при} \quad Pe \frac{2\delta_L}{x} \leq 70, \quad (2)$$

где  $Nu = 2\alpha\delta_L/\lambda_L$ ,  $\lambda_L$  — коэффициент теплопроводности жидкости,  $Pe = RePr$ ,  $Re = W\delta_L/\nu_L$ ,  $W$  — скорость жидкости,  $\nu_L$  — кинематическая вязкость жидкости,  $Pr = \nu_L/a_L$ ,  $a_L$  — коэффициент температуропроводности жидкости,  $x$  — длина канала охлаждения.

Если пренебречь теплоотдачей с торца ребра, то распределение температуры  $T$  по высоте ребра определяется, согласно [6], соотношением:

$$\frac{T - T_L}{T_{WI} - T_L} = \frac{\cos h(m(h - y))}{\cos h(mh)}, \quad (3)$$

где  $T_L$  — средняя температура жидкости в микроканальной структуре,  $T_{WI}$  — температура стенки в основании ребра,  $y$  — координата от основания по высоте ребра,  $m = \sqrt{2\alpha/(\lambda_w\delta_F)}$  или с учетом равенства толщины ребра и ширины межреберного канала этот параметр может быть выражен через шаг орезрения  $s$ , а именно:  $m = \sqrt{4\alpha/(\lambda_w s)}$ .

Коэффициент эффективности ребра  $E$ , показывающий, во сколько раз ребро увеличивает теплоотдачу с рассматриваемого участка неорезренной поверхности, равняется [6]:

$$E = \frac{1 + \frac{\lambda_w m}{\alpha} \text{th}(mh)}{1 + \frac{\alpha}{\lambda_w m} \text{th}(mh)}, \quad (4)$$

а эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_e$  соответствует:

$$\alpha_e = \frac{1 + E}{2} \alpha. \quad (5)$$

Если известна тепловая мощность  $Q$  сборки и площадь  $F$  посадки ее на теплообменник, то температура стенки в основании ребра равна

$$T_{WI} = T_L + \frac{Q}{\alpha_e F}. \quad (6)$$

Температура  $T_{WO}$  внешней поверхности стенки превышает температуру внутренней поверхности на величину перепада в стенке

$$T_{WO} = T_L + \frac{Q}{\alpha_e F} + \frac{Q\delta_w}{\lambda_w F}, \quad (7)$$

а температура  $T_D$  лазерных диодов при термическом сопротивлении  $R$  сборки Silver Bullet составит:

$$T_D = T_L + \frac{Q}{\alpha_e F} + \frac{Q\delta_w}{\lambda_w F} + RQ. \quad (8)$$

В соотношениях (6)–(8) полагается, что площадь посадки сборки примерно равна площади активного отвода

тепла под ней. Так как подогрев воды в микроканальной структуре незначителен по сравнению с температурой диодов, под величиной  $T_L$  можно понимать среднюю температуру воды в теплообменнике.

Потери давления  $\Delta P$  на трение при течении воды в микроканальной структуре соответствуют

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_L W^2}{2} \frac{x}{d_e}, \quad (9)$$

где  $\xi = \frac{512}{f \text{Re}}$ ,  $d_e = \frac{2\delta_i h}{\delta_i + h}$ ,  $\rho_L$  — плотность воды, а коэффициент  $f$  зависит от отношения  $\frac{h}{\delta_i}$  и при изменении последнего от единицы до бесконечности увеличивается от 2.253 до 5.333 [7].

## Результаты расчета

Ниже представлены результаты расчетов температуры диодных линеек и гидравлических потерь давления на трение, выполненные по приведенной выше методике.

Расход воды на одну сборку принят 5 g/s или 0.5 kg/s на метр длины теплообменника. При данном расходе и тепловой мощности сборки 60 W подогрев воды не превышает 3°C. Далее полагается:

— температура воды на входе в теплообменник — 15°C,

— термическое сопротивление сборки Silver Bullet — 0.4°C/W (по данным NG CEO);

— толщина медной стенки теплообменника, отделяющей лазерные сборки от потока воды, равна 0.5 mm.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости температуры поверхности медного теплообменника  $T_{WO}$  и температуры диодных линеек  $T_D$  от ширины щели  $h$  без микрооробрения.

Результаты расчета, проведенного в диапазоне изменения ширины щели  $h = 0.1–1$  mm, показывают:

— температура  $T_{WO}$  находится в диапазоне 50–140°C, что заметно превышает требуемую величину 25°C;

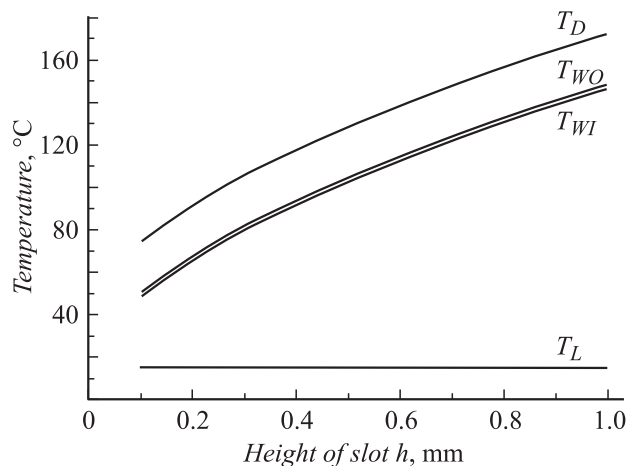


Рис. 3. Зависимость температуры от ширины щели;  $G = 0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .

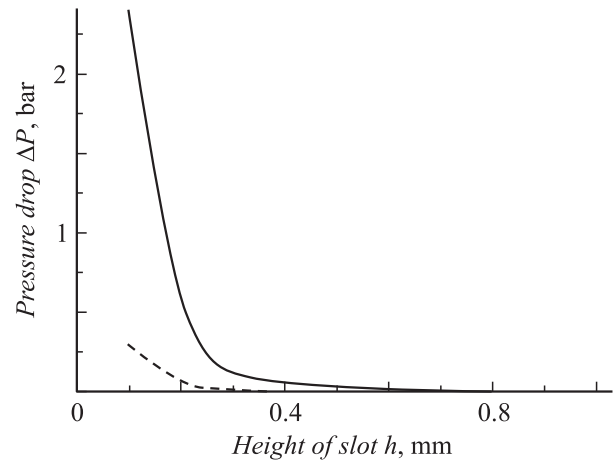


Рис. 4. Гидравлические потери давления на трение в щелевом канале теплообменника без микрооробрения, ---  $G = 0.5$ , —  $1 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .

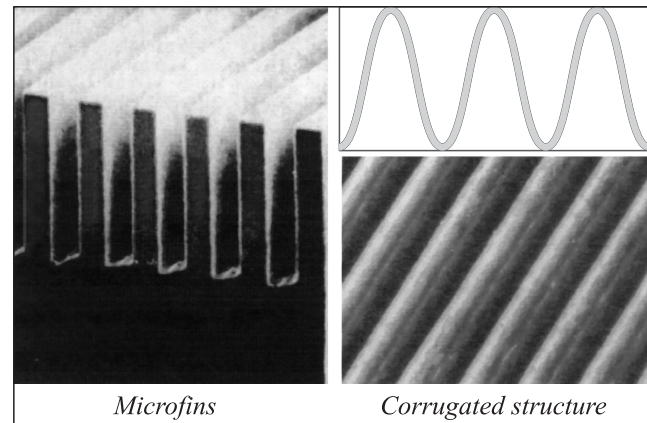


Рис. 5. Оробренные и гофрированные микроканальные структуры.

— температура диодов  $T_D$  недопустимо высока;

— термическое сопротивление стенка–вода является доминирующей величиной в суммарном термическом сопротивлении;

— увеличение расхода воды не дает необходимого снижения термического сопротивления, а гидравлические потери при этом стремительно растут (рис. 4).

— для лазерных диодныхборок 40 W и выше необходимо использовать методы интенсификации теплообмена в щелевом канале охлаждения.

Эффективным способом интенсификации теплообмена в канале охлаждения является микрооробрение стенки теплообменника (рис. 5). В медных теплообменниках микрооробрение с малым шагом 0.05–0.15 mm, технология пайки медной гофрированной фольги является предпочтительной. В теплообменниках из кремния, предложенных LLNL, микрооробрение с шагом 0.05 mm выполняется методом травления, при этом глубина канала травления ограничена.

Ниже представлены результаты расчетов для оребрения, в котором ширина межреберного канала равна ширине ребра. Распределение температуры по высоте ребра из меди и кремния представлено на рис. 6. Высота ребра  $h = 1$  mm, шаг  $s = 0.1$  mm, расход воды  $0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ . Видно, что для выбранных параметров вершина ребра, особенно ребра из кремния, в теплообмене практически не участвует. Следовательно, высота ребра может быть уменьшена.

На рис. 7 показано, что интенсивность теплообмена в канале с микрооребрением в десятки раз превышает интенсивность теплообмена в щелевом канале без ребер. Вследствие более высокой теплопроводности меди интенсивность теплообмена в медном теплообменнике выше, чем в теплообменнике из кремния.

Температура поверхности медного теплообменника и температура диодов в зависимости от шага оребрения

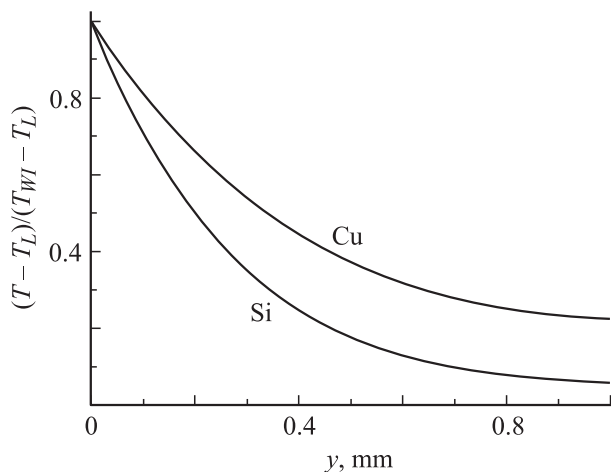


Рис. 6. Распределение температуры по высоте ребер из меди и кремния.

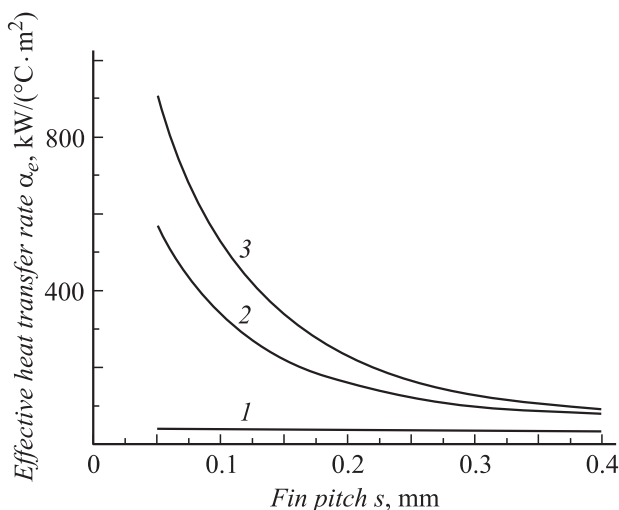


Рис. 7. Зависимость эффективной теплоотдачи от шага оребрения,  $h = 1$  mm; 1 — микрооребрение отсутствует; 2, 3 — Si и Cu теплообменники с микрооребрением.

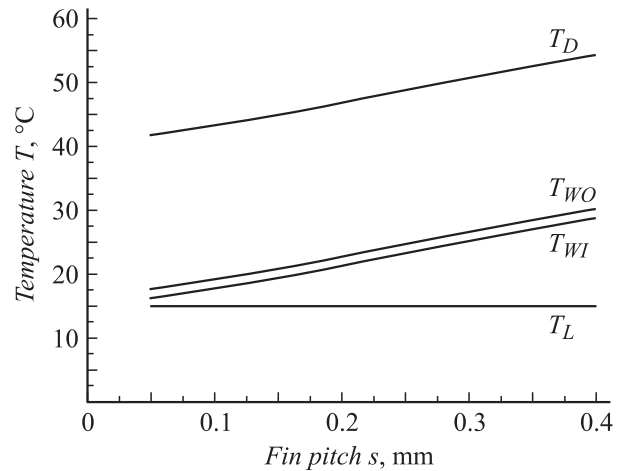


Рис. 8. Зависимость температуры диодов и стенки медного теплообменника от шага оребрения,  $h = 1$  mm,  $G = 0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .

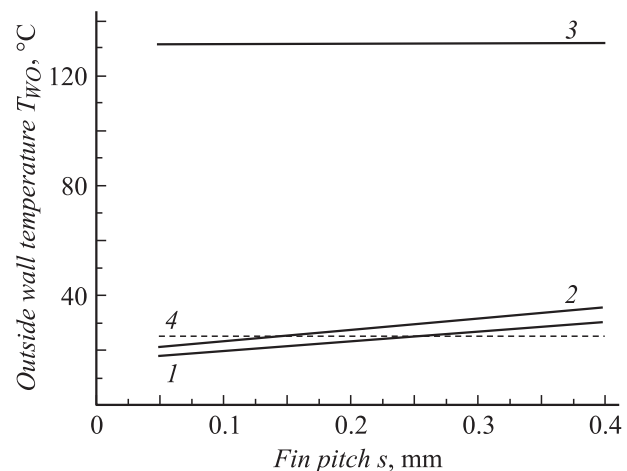
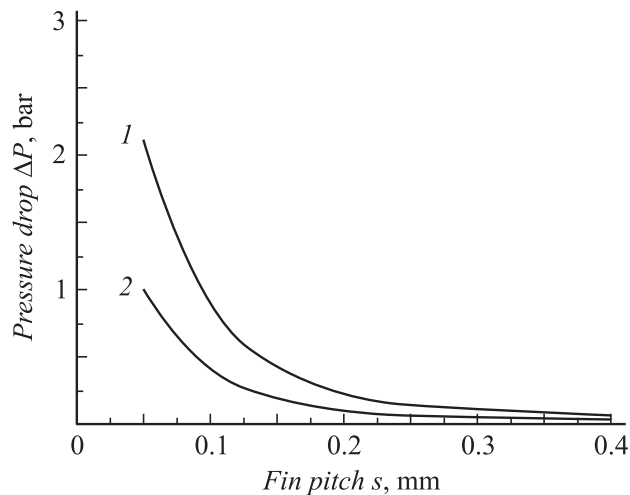


Рис. 9. Зависимость температуры внешней поверхности стенки теплообменника от шага оребрения;  $T_L = 15^\circ\text{C}$ ,  $G = 0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ,  $h = 1$  mm; 1 — медный теплообменник с микрооребрением; 2 — теплообменник из кремния с микрооребрением; 3 — медный теплообменник с щелевым каналом без микрооребрения; 4 — номинальная температура внешней поверхности стенки теплообменника ( $25^\circ\text{C}$ ).

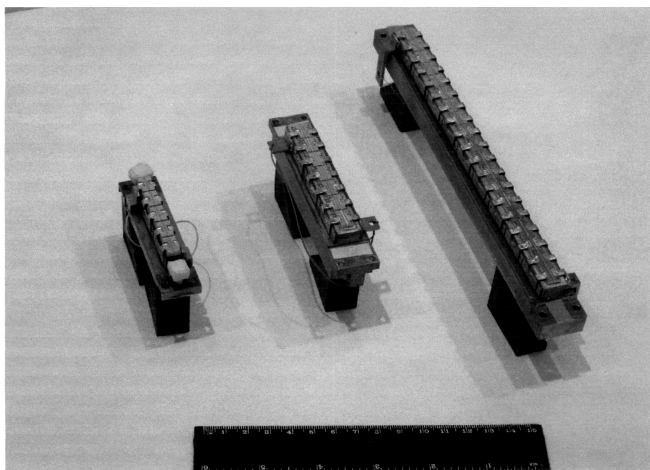
показана на рис. 8. Очевидно, что применение микрооребрения позволяет существенно снизить эти температуры. Доля термического сопротивления стенка–вода перестает быть доминирующей, хотя еще остается довольно заметной при больших шагах оребрения.

Сравнивая теплообменники из меди и кремния, следует отметить, что температура поверхности теплообменника, на которой расположены лазерные сборки, в медном теплообменнике становится меньше требуемого уровня  $25^\circ\text{C}$  при более крупном шаге микрооребрения, чем в теплообменнике из кремния (рис. 9).

Из гидравлического расчета следует, что потери давления на трение в микроканальной структуре, вы-



**Рис. 10.** Зависимость гидравлических потерь давления на трение в микроканальной структуре от шага оребрения;  $G = 0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ; 1 — 0.5, 2 —  $h = 1 \text{ mm}$ .



**Рис. 11.** Модули накачки со сборками Silver Bullet непрерывного действия суммарной мощностью 100 W, 280 и 760 W.

полненной в виде микрооребрения, при номинальном расходе  $0.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  и шаге оребрения более  $0.1 \text{ mm}$  не превышают  $0.25 \text{ bar}$  для высоты ребра  $h = 1 \text{ mm}$  и  $0.6 \text{ bar}$  — для  $h = 0.5 \text{ mm}$ .

Проведенные расчеты показали, что теплообменники с микрооребрением или гофрированной фольгой в качестве микроканальной структуры могут быть успешно использованы при создании мощных модулей диодной накачки на основе лазерных диодныхборок Silver Bullet со средней мощностью излучения  $40 \text{ W}$  и выше.

На основе результатов расчетов были созданы медные теплообменники для накачных модулей различной мощности. На рис. 11 представлена фотография модулей мощностью 100, 280 и 760 W, который собран из 19борок лазерных диодныхборок Silver Bullet по  $40 \text{ W}$  каждая.

## Заключение

1. Проведенные расчеты показали, что для обеспечения температурного режима диодныхборок в сборках Silver Bullet повышенной мощности необходимо применять методы интенсивного теплообмена в теплообменниках, на поверхности которых эти сборки расположены. Щелевой канал охлаждения без интенсификации теплообмена не может обеспечить требуемый температурный режим диодов при разумной разности температуры охлаждающей жидкости и поверхности теплообменника, т. е. в щелевом канале необходимо располагать микроканальную структуру.

2. Применение микрооребрения или высокотеплопроводной гофрированной фольги в качестве микроканальной структуры позволяет обеспечить необходимый теплообмен в сотни  $\text{kW}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2)$ .

3. Медные теплообменники обеспечивают требуемый температурный режим при более крупном шаге оребрения, чем теплообменники из кремния. При равных условиях температура диодов в сборках на медном теплообменнике ниже, чем на теплообменнике из кремния.

4. С использованием результатов расчета созданы медные теплообменники с оребрением и на их основе модули с лазерными сборками Silver Bullet непрерывной (средней) мощностью излучения до  $760 \text{ W}$  при перепаде давления на модуле менее  $1 \text{ atm}$ .

## Список литературы

- [1] Аполлонов В.В., Державин С.И., Кузьминов В.В., Машковский Д.А., Тимошкин В.Н., Филоненко В.А. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 1. С. 87.
- [2] Beach R., Benett W., Freitas B. et al. // IEEE J. Quantum Electronics. 1992. Vol. 28. N 4. P. 966.
- [3] Ebert T., Treusch G., Loosen P et al. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3097.
- [4] Глухих И.В., Поликарпов С.С., Степанов А.В. и др. // Мат. 5-го Белорусско-Российского Семинара. Минск, Беларусь, 2005.
- [5] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Л.: Изд-во машиностроительной литературы, 1962. 176 с.
- [6] Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. 52 с.
- [7] Лойцянский Л.Г. // Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 441 с.