

07

Дополнительные возможности использования порометаллов для охлаждения линеек лазерных диодов

© В.В. Аполлонов, С.И. Державин, В.Н. Тимошкин

Институт общей физики РАН, Москва

E-mail: vtim@karella.gpi.ru

Поступило в Редакцию 8 января 2002 г.

Предложена схема использования порометаллов для охлаждения линеек лазерных диодов, позволяющая совместным образом реализовать двухмерный режим теплоотвода и уменьшить длину фильтрации охлаждающей жидкости. Рассчитаны характерные значения тепловых потоков, которые способен отвести теплообменник из проницаемого порометалла при условии поддержания предельно допустимой температуры активного слоя линейки.

В нашей работе [1] было предложено использовать проницаемые порометаллические материалы (порометаллы) в излучателях на основе линеек лазерных диодов для интенсификации теплоотвода, а тем самым для повышения мощности излучения. Их отличительной особенностью является развитая стохастическая структура каркаса, позволяющая реализовать предельные возможности интенсификации теплоотвода, которые могли бы быть достигнуты за счет оптимизации структуры микроканалов. Для анализа теплообмена в [1,2] использовалась одномерная модель, которая применима, когда эффективная длина поглощения тепла меньше характерных размеров линейки, что выполняется для большого класса порометаллов в широкой области изменения значений их характеристик. Но в большей степени рассмотрение одномерного режима теплоотвода было связано с необходимостью учета сильной

зависимости теплоотводящих свойств пористого слоя от его толщины в направлении фильтрации жидкости [3]. В [1] выбиралось минимально возможное значение — поперечный (по оптической оси диодов) размер линейки, равный приблизительно $500\ \mu\text{m}$. Значимость этого фактора для использования порометаллов (как и для любых микроканальных теплообменников) только возрастает в связи с современной тенденцией перехода к широким линейкам (до $2\ \text{mm}$). Кроме того, одномерный режим ограничивает возможные значения тепловых потоков, отводимых от активной области линейки.

Таким образом, повышение эффективности использования порометаллического слоя для охлаждения линеек лазерных диодов может быть достигнуто за счет реализации двухмерного теплоотвода и/или сокращения длины фильтрации жидкости. В данной работе предлагается модульная схема компоновки пористого слоя, которая позволяет реализовать оба этих фактора совместно. В этой схеме теплопоглощающий слой собирается из одинаковых фрагментов-модулей порометалла, разделенных в местах их соединения непроницаемыми перегородками из того же материала, что и каркас порометалла, и имеющих толщину порядка характерного диаметра структурообразующих элементов каркаса (рис. 1). По обеим сторонам перегородки оставлены небольшие зазоры для ввода и отвода охлаждающей жидкости [4]. За счет перегородок общий поток охлаждающей жидкости разбивается на равные составляющие, каждая из которых охлаждает отдельный модуль, протекая при этом в направлении вдоль продольной оси линейки. Учитывая малость толщины перегородок и ширины зазоров по сравнению с шириной модуля, подобная структура может рассматриваться как сплошной пористый слой, эффективная длина фильтрации жидкости в котором равна толщине модуля и, в отличие от случая [1], может быть выбрана в несколько раз меньшей, чем ширина линейки.

Так же как и в [1], рассмотрим задачу об определении характерных значений предельно возможных тепловых потоков Q , отводимых пористым слоем, которые ограничиваются допустимой величиной нагрева активного слоя линейки T^* . Так, например, для наиболее распространенных линеек на основе арсенида галлия эта величина составляет не более 50°C [5]. В соответствии с результатами [1] в приближении теплоизолированного катода и пренебрежении джоулевыми источниками вне активного слоя $Q = T^*/(r_T + R_T)$, где R_T , r_T — удельные (на единицу площади) тепловые сопротивления пористого слоя и отделяющей его от активной области совокупности p -слоя

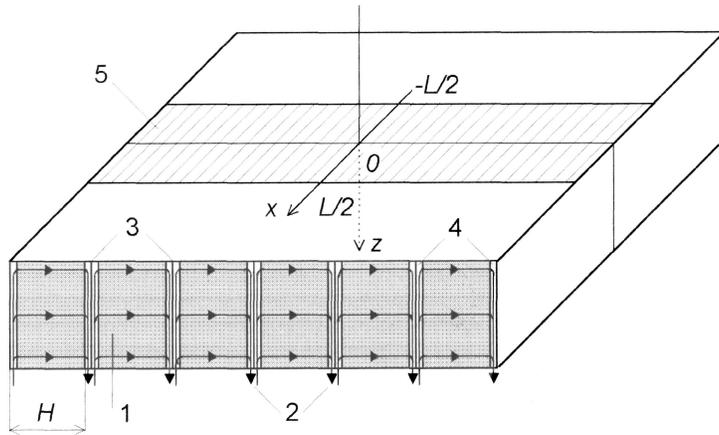


Рис. 1. Схема модульного пористого слоя: 1 — пористые модули, 2 — поток охлаждающей жидкости, 3 — перегородки, 4 — зазоры для подачи и отвода охлаждающей жидкости, 5 — площадка контакта с линейкой лазерных диодов.

линейки, анода и припоя соответственно. Поскольку нас интересуют максимально возможные значения отводимых потоков, рассматриваем стационарный режим и считаем, что характерные размеры пористого слоя по всем направлениям превышают характерную длину поглощения тепла $\Lambda = \gamma^{-1}$. Поэтому можно рассматривать теплоотвод (который осуществляется практически только по каркасу) в полупространство, заполненное пористой средой:

$$(\partial_x^2 + \partial_z^2)T - \gamma^2 T + q(\mathbf{r}) = 0$$

с граничными условиями $\partial_z T = 0$, $z = 0$, $T = 0$, $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$. Значения температуры $T(x, z)$, $z \geq 0$ отсчитываются от температуры охлаждающей жидкости на входе в каналы. Плоский источник на поверхности слоя $q(\mathbf{r})$ ограничен размерами контактной площадки пористого слоя с линейкой (рис. 1):

$$q(\mathbf{r}) = \frac{q}{\kappa} \delta(z) \theta\left(x + \frac{L}{2}\right) \theta\left(\frac{L}{2} - x\right),$$

q — плотность теплового потока, κ — теплопроводность порометалла, L — толщина линейки, $\theta(x)$ — функция Хевисайда.

Эта задача решается с помощью преобразований Фурье: соз-преобразования по координате z и экспоненциального — по x . Окончательно интересующее нас температурное распределение в плоскости $z = 0$ имеет вид

$$T(x, 0) = \frac{q}{\pi\kappa\gamma} [F(1_+) \mp F(1_-)], \quad (1)$$

где верхний знак выражения в скобках относится к области $x > L/2$, нижний — к интервалу $0 \leq x \leq L/2$, и использованы обозначения

$$F(s) = \gamma s K_0(\gamma s) + \frac{\pi}{2} \gamma s [K_0(\gamma s)L_1(\gamma s) - K_1(\gamma s)L_0(\gamma s)],$$

$K_n(s)$ — функция Макдональда, $L_n(s)$ — модифицированная функция Струве [6],

$$1_+ = x + \frac{L}{2}, \quad 1_- = \left| x - \frac{L}{2} \right|.$$

При $x \gg L/2$ $T(x, 0) \propto e^{-\gamma x} / \sqrt{\gamma x}$. Характеризующее поглощение тепла в объеме пористого слоя, распределение по z при $z \gg L/2$ есть $T(0, z) \propto e^{-\gamma z} (1 - L\sqrt{\gamma}/2\pi z)$.

Для получения из (1) численных значений предельных тепловых потоков Q использовался упоминавшийся в [1] пример высокопористого (со средней пористостью $\Pi > 0.7$) материала, описанного в [7,8], который здесь выбран как отвечающий условию реализации двухмерного режима $\Lambda > L$. В интервале чисел Пекле $Pe = d_p V / \chi$ от 50 до 2000 для этого материала хорошо выполняется эмпирическая зависимость $Nu = 0.606 Pe^{0.56}$ [7,8]. Здесь Nu — число Нуссельта для пор, которое связано с обратной длиной поглощения тепла соотношением $\gamma^2 = \kappa_l Nu / \kappa_p d_p^2$, κ_l и χ — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности жидкости; $d_p = d\Pi / (1 - \Pi)$ — средний диаметр пор для случая проволочной структуры каркаса со средним диаметром волокон d , $\kappa_p = \kappa_0(1 - \Pi) / (1 + \Pi)^2$ — эффективная теплопроводность каркаса, κ_0 — теплопроводность его материала в компактном состоянии. Средняя скорость фильтрации жидкости V по пористому слою вдоль охлаждаемой поверхности рассчитывалась из уравнения [3,8]

$$p/H = a\eta V + b\rho V^2, \quad (2)$$

p — перепад давления на участке слоя с толщиной H ; η , ρ — динамическая вязкость и плотность жидкости. Для рас-

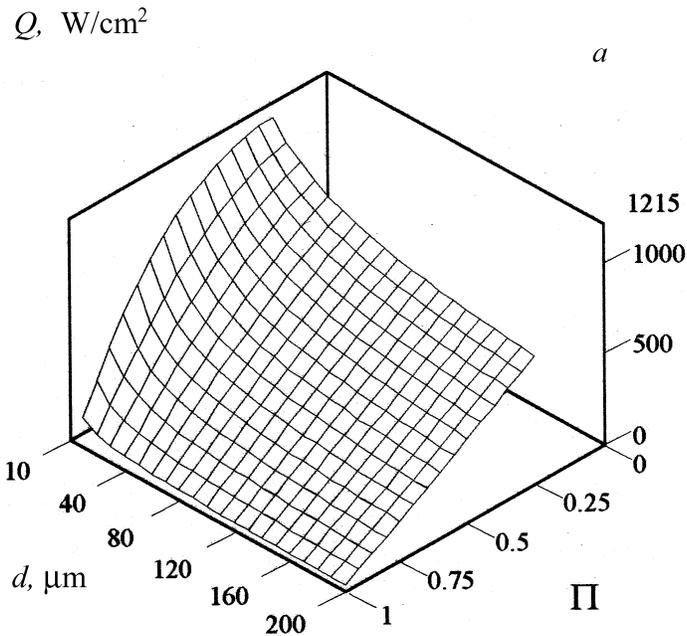


Рис. 2. Предельные тепловые потоки Q , отводимые слоем порометалла с $Nu = 0.606 Re^{0.56}$ от активного слоя при допустимом нагреве активного слоя на 15°C , в зависимости от диаметра проволоки d μm , и средней пористости Π : a — для двухмерного теплоотвода в модульном слое (по формуле (1)) b — для одномерного теплоотвода в сплошном слое (на основе результатов из [1]).

смаатриваемого порометалла коэффициенты этого уравнения равны $a = 6.61 \cdot 10^9 (1 - \Pi)^{1.98} d^{-1.98} \Pi^{-6.73} \text{ cm}^{-2}$, $b = 5.16 \cdot 10^3 \times (1 - \Pi)^{1.07} d^{-1.07} \Pi^{-13.07} \text{ cm}^{-1}$, здесь d выражен в μm .

Чтобы иметь возможность сравнить с результатами для одномерного режима, будем использовать те же значения параметров, что и в [1]: $T^* = 15 \text{ K}$ (отсчитывая от температуры охладителя — воды при комнатной температуре), $r_T \sim 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$, $p = 1 \text{ atm}$, $L = H = 0.5 \text{ mm}$. Удельное тепловое сопротивление пористого слоя вычислялось по усредненному в пределах поверхности нагрева температурному распределению $R_T = \langle T(x, 0) \rangle / q$.

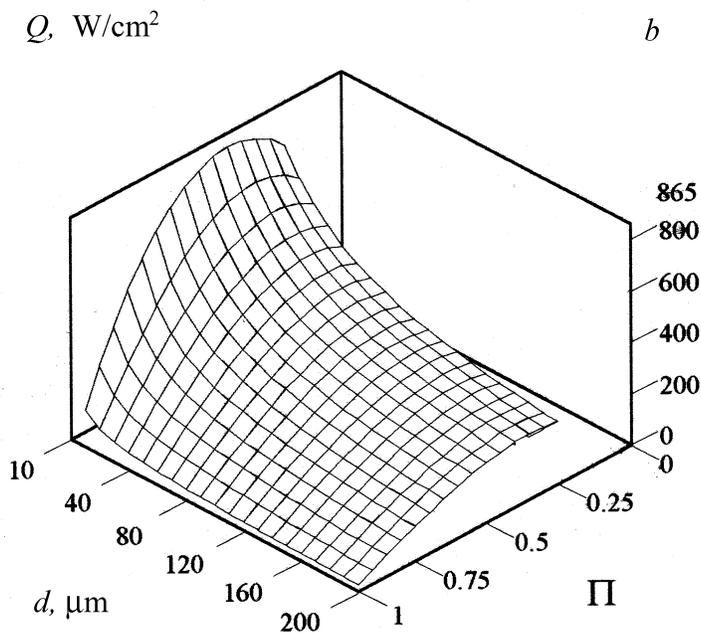


Рис. 2 (продолжение).

Рассчитанная по выражениям (1) и (2) и этим значениям зависимость $Q(\Pi, d)$ представлена на рис. 2, *a*, и для сравнения на рис. 2, *b* она же, рассчитанная для одномерного решения по результатам [1]. Очевидно, что двухмерный теплоотвод для этого класса порометаллов ($\Lambda > L$) обеспечивает существенный прирост характерных значений предельных тепловых потоков по сравнению с одномерным случаем. Аналогичные расчеты были выполнены и для рассмотренной в [1] унифицированной зависимости $Nu = 0.004 Re$ (только в отличие от приведенного выше случая здесь Re определяется по величине b/a вместо d_p). В последнем случае учет двухмерного растекания теплового потока дает отличие от одномерного результата для Q не более 5%, как и следовало ожидать для условия $\Lambda \ll L$.

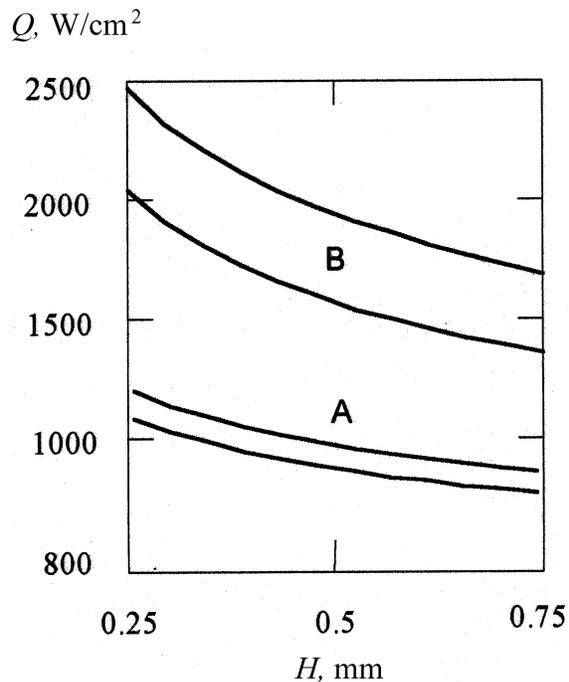


Рис. 3. Зависимость предельных тепловых потоков Q от толщины модулей H для порометаллов с $Nu=0.606 Re^{0.56}$ (A) и с $Nu=0.004 Re$ (B) при $d = 10 \mu m$ и $\Pi = 0.65$ для $p = 1 \text{ atm}$ (нижняя линия пары) и $p = 2 \text{ atm}$ (верхняя линия пары).

Отметим особо, что характерные значения Q , отображенные на рис. 2, а, могут быть существенно превзойдены за счет увеличения предельно допустимого нагрева активного слоя T^* , а также с использованием меньшей, чем при расчетах, ширины пористых модулей H , т. е. уменьшив длину фильтрации жидкости. Данные на рис. 3, полученные из уравнения (2), иллюстрируют зависимость предельных потоков Q от длины фильтрации жидкости H и подтверждают исходные положения статьи о зависимости эффективности охлаждения от этой величины.

В большинстве современных конструкций излучателей, чтобы обеспечить выход излучения, линейки располагают на краю теплообменни-

ка [9], т.е. теплоотвод осуществляется в четверть пространства (что соответствует области $x > -L/2$, $z > 0$ на рис. 1). Полученное выше решение (1) зеркально-симметрично относительно плоскости $x = 0$ и может рассматриваться как объединение двух независимых температурных распределений в соседних четвертях пространства с общей теплоизолированной передней стенкой ($\partial_x T|_{x=0} = 0$), создаваемых источниками, которыми являются половинки линейки, разделенные этой плоскостью. Этому случаю положения линейки на краю теплоотвода будут соответствовать половинные значения тепловых потоков, вычисленные по формуле (1), в которой L заменено на $2L$.

Представляет особый интерес случай, когда прокладки, разделяющие пористые модули, имеют толщину, превышающую характерный диаметр каркаса, так что всю структуру можно рассматривать как совокупность параллельных щелевых каналов, образованных перегородками, промежутки между которыми заполнены порометаллом. Следует ожидать, что при определенном соотношении толщин прокладок и пористых модулей теплоотводящие свойства подобной композиционной структуры будут превышать таковые как для сплошного, так и для модульного пористого слоя с тонкими перегородками.

Список литературы

- [1] Аполлонов В.В., Державин С.И., Тимошкин В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 1. С. 87–94.
- [2] Apollonov V.V., Derzhavin S.I., Timoshkin V.N. et al. // Optics Express. 1999. V. 4. N 1. P. 27–35. <http://epubs.osa.org/opticsexpress>.
- [3] Пористые проницаемые материалы / Под ред. С.В. Белова. М.: Наука, 1987. 340 с.
- [4] Заявка № 2001132964 от 07.12.2001.
- [5] SDL Product Catalog 96/97 — SDL Inc., 1996.
- [6] Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.
- [7] Гортышов Ю.Ф., Муравьев Г.Б., Надыров И.Н. // ИФЖ. 1987. Т. 53. № 3. С. 357–361.
- [8] Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. М.: Изд-во МИФИ, 1993. 152 с.
- [9] Solarz R.W., Emanuel M.A., Skidmore J.A. et al. // Laser Physics. 1998. V. 8. N 3. P. 737–740.