

ОПТИМАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ВЫСОКОЙ МОЩНОСТЬЮ НАКАЧКИ

Г.А. ГЕВОРГЯН

Институт физических исследований НАН Армении

(Поступила в редакцию 11 февраля 1999 г.)

Исследована возможность получения максимальных чисел Рейнольдса в каналах охлаждения активного элемента и лампы накачки непрерывного твердотельного лазера с воздушным охлаждением. Проведена оптимизация параметров системы охлаждения лазера. Показано, что при последовательном соединении каналов охлаждения активного элемента и лампы накачки к пневмосети число Рейнольдса возрастает почти вдвое, а коэффициент теплоотдачи – в 1,37 раза по сравнению с их параллельным соединением.

В работах, посвященных исследованию и созданию лазеров с воздушным охлаждением, в каналах охладителей реализуются величины чисел Рейнольдса Re в пределах $(0,5-1,5) \cdot 10^5$ [1-5]. Подобные низкие значения чисел Рейнольдса не позволили авторам работ превысить значение мощности накачки 750-800 Вт и осуществить генерацию лазеров в непрерывном режиме. В связи с этим представляет большой практический интерес исследование возможности достижения максимальных чисел Рейнольдса в каналах охладителей и реализации генерации таких лазеров в непрерывном режиме работы.

Рассмотрим один из каналов охлаждения лазера, в котором коаксиально вмонтировано охлаждаемое тело (активный элемент или лампа накачки), в промежутках между ним и стенками канала протекает газообразный хладагент и имеет место гладкостенный режим его протекания [6] (т.е. реализуется режим, когда выступы шероховатостей на поверхности охлаждаемого элемента и на стенках канала намного меньше толщины пристеночного слоя протекающего хладагента). Известно [6,7], что наиболее эффективное охлаждение потоком воздуха в каналах происходит в режимах развитой турбулентности течения при величине числа Рейнольдса Re больше $2,3 \cdot 10^3$, которая может быть достигнута при условии реализации в каналах высоких скоростей (V) протекания хладагента и подборе оптимальных геометрических размеров канала. Прежде чем переходить к выбору геометрических размеров канала, рассмотрим некоторые ограничения на протекание хладагента по каналу. Примем, что течение хладагента в канале является дозвуковым, т.е. выполняется условие

$$V \leq V_{зв} (330 \text{ м/сек}). \quad (1)$$

Скорость протекания хладагента по каналу измеряется величиной его расхода через площадь поперечного сечения канала. В этом случае,

для фиксированных значений диаметра охлаждаемого элемента d_1 и внутреннего диаметра канала охлаждения d_2 , расход хладагента выразится уравнением

$$Q = \frac{\pi V}{4} (d_2^2 - d_1^2), \quad (2)$$

где $Q = Q_{\text{пред}}$, когда $V = V_{\text{вз}}$.

На рис.1 представлена экспериментально полученная зависимость $Q_{\text{пред}}$ от величины зазора в канале охлаждения $\Delta = (d_2 - d_1)/2$, где $(d_2 - d_1)$ – гидравлический диаметр канала охлаждения. Выше этой кривой (заштрихованная зона) расположена зона, где условие (1) не выполняется.

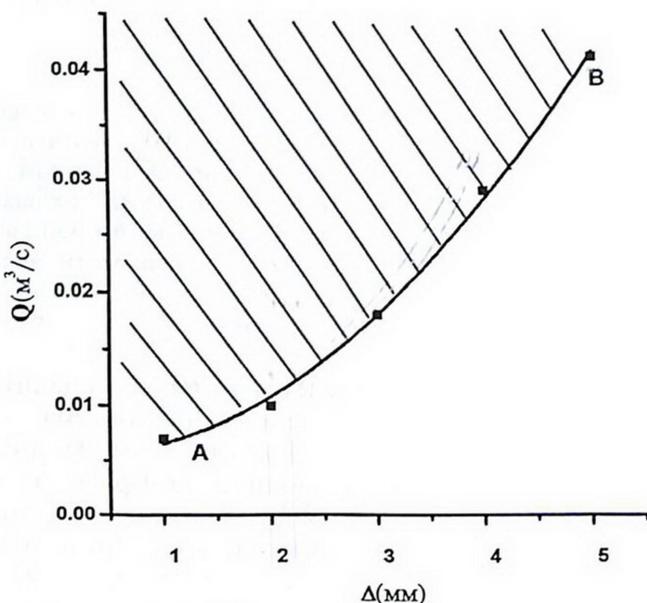


Рис.1. График зависимости расхода хладагента от величины зазора канала охлаждения. Кривая АВ получена экспериментально при давлении в пневмосети $P = 3 \cdot 10^5$ Па.

Другим возможным ограничением может являться способность пневмосети обеспечивать необходимую величину расхода воздуха при заданной величине давления. В этом случае, при конструировании лазеров с воздушным охлаждением необходимо знать эмпирическую зависимость $Q = f(P)$ системы охлаждения

$$P = \frac{A}{Q}, \quad (3)$$

где A – постоянный параметр для каждой отдельной системы охлаждения при давлении P . Для выбора оптимального значения зазора Δ используем зависимость числа Рейнольдса от размеров канала, записанную в виде [6-8]

$$\text{Re} = \frac{(d_2 - d_1)V}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – вязкость хладагента.

Расчет и экспериментальное получение зависимости числа Рейнольдса от зазора канала проводились для расхода воздуха в диапазоне $Q = 0,007-0,042 \text{ м}^3/\text{с}$ и давления в пневмосети $P = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$. При подключении пневмосети с давлением P к системе охлаждения, согласно (2) и (4), величина числа Рейнольдса выразится уравнением

$$Re = \frac{4Q}{\pi v(d_2 + d_1)}. \quad (5)$$

На рис.2 приведен график зависимости числа Рейнольдса от величины зазора в канале охлаждения. Как видно из рисунка, при значении величины зазора порядка 1,5 мм реализуются числа Рейнольдса $\sim 4 \cdot 10^5$, что позволяет при использовании пневмосети с давлением до $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, расходом воздуха до $0,021 \text{ м}^3/\text{сек}$, реализовать работу твердотельного лазера с мощностью накачки до 3,5 кВт в непрерывном режиме.

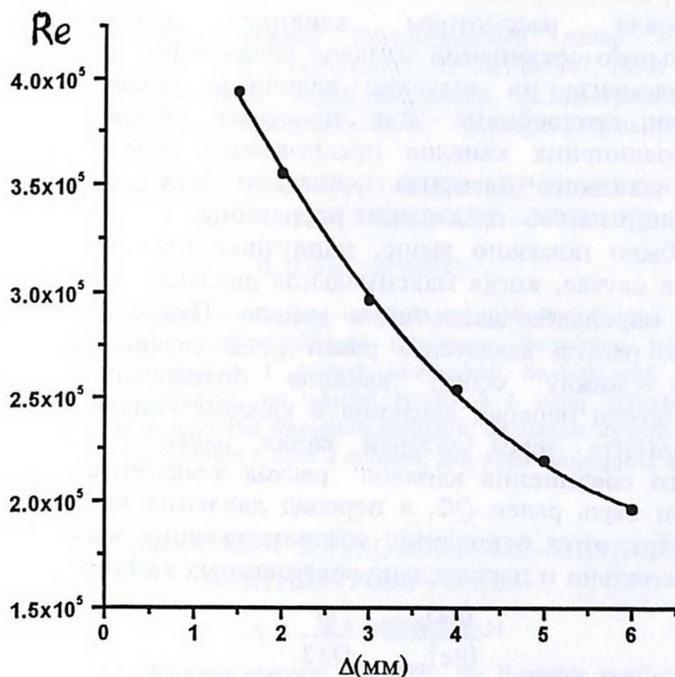


Рис.2. График зависимости величины числа Рейнольдса от величины зазора канала охлаждения (при $Q = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$) лазера с воздушным охлаждением.

Величина оптимального зазора в канале охлаждения созданного лазера при приведенных выше параметрах системы охлаждения и геометрических размерах охлаждаемых элементов равнялась 1,5-2,0 мм [9].

Следует сказать, что формула (5) верна до определенного значения зазора, обеспечивающего функционирование лазера в непрерывном режиме. При дальнейшем его уменьшении на канале охлаждения начинает резко увеличиваться давление, выраженное уравнением [6,8]

$$P_1 = k \frac{L}{d_2 - d_1} \rho \frac{V^2}{2g}, \quad (6)$$

где k – коэффициент гидравлического сопротивления (его значения табулированы в [8]), L – длина канала охлаждения, ρ – плотность газообразного хладагента, g – ускорение свободного падения.

Подставив значение скорости из (6) в (4), получим величину числа Рейнольдса для малых зазоров канала охлаждения:

$$\text{Re} = \frac{d_2 - d_1}{\nu} \sqrt{\frac{2gP_1(d_2 - d_1)}{kL\rho}}. \quad (7)$$

Расчеты по формуле (7) показывают, что при вышеприведенных технических и геометрических параметрах системы охлаждения уменьшение зазора ниже 1,5 мм приводит к резкому падению числа Рейнольдса. На эксперименте это выражалось быстрым нагревом активного элемента, что приводило к срыву генерации лазера. При “критических” зазорах канала вступает в силу фактор сопротивления пристеночного слоя протекающего хладагента.

Далее, для выбранных значений числа Рейнольдса и величины зазора канала рассмотрим влияние параллельного или последовательного соединений каналов охлаждения лампы накачки и активного элемента на значение величины числа Рейнольдса и коэффициента теплообмена. Для простоты сравнения указанных вариантов соединения каналов предположим, что размеры лампы накачки и активного элемента совпадают между собой, т.е. что соответствующие каналы охлаждения идентичны.

Как было показано выше, наилучшее охлаждение в каналах реализуется в случае, когда максимальное давление в пневмосети P_{\max} совпадает с перепадом давления в канале. Пусть соответствующий этому случаю расход хладагента равен Q . В случае последовательно соединенных между собой каналов оптимальное охлаждение реализуется, когда перепад давления в каждом канале равен $P_{\max}/2$, а расход хладагента через каждый канал равен Q . В случае же параллельного соединения каналов расход хладагента через каждый канал должен быть равен $Q/2$, а перепад давления на каждом канале равен P_{\max} . При этом отношение соответствующих чисел Рейнольдса для последовательно и параллельно соединенных каналов равняется

$$\frac{(\text{Re})_{\text{посл}}}{(\text{Re})_{\text{парал}}} = \frac{Q}{Q/2} = 2, \quad (8)$$

а отношение зазоров друг к другу $(d_2 - d_1)_{\text{посл}} / (d_2 - d_1)_{\text{пар}} = 1,34$.

Поскольку коэффициенты теплообмена при последовательном и параллельном соединении каналов активного элемента и лампы накачки относятся друг к другу следующим образом [8,10]:

$$\frac{(\alpha)_{\text{посл}}}{(\alpha)_{\text{парал}}} = \frac{(d_2 - d_1)_{\text{парал}}}{(d_2 - d_1)_{\text{посл}}} \cdot \left[\frac{(\text{Re})_{\text{посл}}}{(\text{Re})_{\text{парал}}} \right]^{0,875}, \quad (9)$$

то получим, что коэффициент теплообмена при последовательном соединении каналов в 1,37 раза больше, чем при параллельном соединении. После проведенной оптимизации, при тех же вышеприведенных параметрах источника охлаждения, элементов квантрона и резонатора, была получена выходная мощность лазера $P'_{\text{вых}} \sim 28$ Вт.

Автор выражает благодарность Р.Б.Костяню за полезные обсуждения результатов эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Р.Белостоцкий, Н.Д.Колышев, А.П.Меркулов, В.М.Овчинников. ОМП, №7, 35 (1968).
2. В.А.Алексеев, С.И.Ханков. ЖПС, 36, 568 (1982).
3. В.М.Митькин, О.С.Щавелев, Н.Н.Бункина. ЖПС, 23, 218 (1975).
4. Г.Н.Дульнев, С.И.Ханков. ИФЖ, 41, 85 (1982).
5. Г.Н.Дульнев, Б.А.Ермаков, С.И.Ханков. ИФЖ, 42, 307 (1982).
6. Тепло- и массообмен. Технический эксперимент. Справочник под общей редакцией В.А.Григорьева, В.М.Зорина. М., Энергоиздат, 1982.
7. Г.Н.Дульнев. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
8. М.Х.Ибрагимов, В.И.Субботин, В.П.Бобков, Г.И.Сабелев, Г.С.Таранов. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М., Атомиздат, 1978.
9. Г.А.Геворгян, Е.В.Кошеверский. Твердотельный лазер с воздушным охлаждением. Авторское свидетельство СССР №1289347, 1984.
10. Г.А.Геворгян, Р.Б.Костянян, Е.В.Кошеверский, К.Е.Каграманян. Сборник трудов конференции "Лазерная физика-95". Аштарак, Армения, 1995, с.32.

ՄԵԾ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄՂԱՍԱՐԲ, ԱՆԸՆԴՀԱՏ ԳՈՐԾՈՂՈՒԹՅԱՆ ՊԻՆԴ
ՍԱՐՄԱՅԻՆ ԼԱԶԵՐԻ ՕԴՈՎ ՍԱՆԵՑՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ՀԱՍՎԱՐԳ
Գ.Ա.ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

Հետազոտված է օդով սառեցվող, անընդհատ, պինդմարմնային լազերի ակտիվ էլեմենտի և մղող լամպի սառցուղիներում Ռեյնոլդսի մարսիմալ քվերի սառցման հնարավորությունը: Կատարված է լազերի սառեցման համակարգի պարամետրերի օպտիմացումը: Ցույց է տրված, որ ակտիվ էլեմենտի և մղող լամպի սառցուղիները պնևմատիկ ցանցին հաջորդաբար միացման դեպքում, զուգահեռ միացման տարբերակի համեմատ, Ռեյնոլդսի թիվը աճում է մոտ 2 անգամ, իսկ ջերմաստվությունը գործակիցը՝ 1,37 անգամ:

OPTIMAL SYSTEM OF AIR-COOLING FOR SOLID-STATE CW LASERS WITH HIGH PUMP POWER

G.A.GEVORGIAN

The possibility for obtaining maximal values of the Reynolds numbers in the cooling channels of the active rod and pumping lamps of CW laser with air-cooling is investigated. The parameters of laser cooling system are optimized. It is shown that at the consequence connection of cooling channels of the active rod and pumping lamp with pneumoset the Reynolds numbers increase by twice and the heat-exchange coefficients by 1.37 in comparison with the parallel connection.