

微球喇曼激光器的性能研究

温国斌, 杨 莉, 刘丽飒, 蔡志平

(厦门大学物理学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 由光学球微腔与光纤耦而构成的喇曼激光器大大降低了阈值泵浦功率, 明显提高了总体效率. 本文对微球喇曼激光器的性能进行了详细的理论模拟研究, 从泵浦信号和喇曼信号的速率方程出发, 推导出微球喇曼激光器的阈值公式, 讨论和分析了微球喇曼激光器的球微腔与熔锥光纤的耦合特性及耦合对激光器阈值的影响, 并提出了提高该激光器耦合效率的有效方案.

关键词: 球微腔; 喇曼激光器; 激光器阈值; 熔锥光纤

中图分类号: TN 248.1

文献标识码: A

光学介质微球有着很多优良的光学特性^[1], 它的特性源于其独特的回廊模(WGM), 其中, 低非线性效应的阈值条件在制备低阈值激光器中得到重要应用. 最近, Spillane 等人已成功制成用介质微球作为谐振腔的超低阈值的喇曼激光器^[2]. 由介质球微腔与光纤耦而构成的喇曼激光器大大减少了必需的阈值泵浦功率, 明显提高了总体效率, 微球喇曼激光器中的阈值特性对该种激光器的研究有着重要的意义. 本文从泵浦信号和喇曼信号的速率方程出发, 第 1 次详细给出了微球喇曼激光器阈值公式的推导过程, 其推导结果与 Spillane 等发表的结果非常一致^[2]. 在此阈值公式的基础上, 结合耦合贡献 Q_c 值与球微腔-光纤间距的关系^[3], 系统分析了微球喇曼激光器阈值和微球-光纤间距的关系; 对文献[4]中的峰值耦合效率和耦合间距的关系进行了详细的模拟计算, 提出了峰值耦合效率和喇曼激光器阈值的对应关系. 该对应关系对于分析和提高微球喇曼激光器效率和其他微球激光器有着重要的理论指导意义. 在提高微球喇曼激光器的效率方面, 我们发现对泵浦光的中心频率的调谐使光纤到微球腔的功率传输有一定的提高, 但如果要更大地提高激光器的总体效率, 则可以考虑提高泵浦光的耦合输入和喇曼

光的输出效率.

1 阈值公式推导

微球喇曼激光器的阈值公式对分析该种激光器的性能有着重要的意义. 为了对影响该种激光器阈值的因素有明确的认识, 我们从泵浦光和信号光的速率方程出发, 详细推导了微球喇曼激光器的阈值公式, 该公式与 Spillane 等发表的结果^[2]十分吻合.

首先从速率方程出发, 当用单色泵浦放大一个单色信号时, 有^[5]

$$\frac{dI_p}{dz} = -\rho I_p - \frac{s}{p} g_R(\cdot) I_p I_s \quad (1)$$

$$\frac{dI_s}{dz} = -s I_s + g_R(\cdot) I_p I_s \quad (2)$$

其中, I_p 是泵浦光强, I_s 是喇曼光强, $g_R(\cdot)$ 是喇曼增益系数, ρ 是泵浦光损耗, s 是信号光损耗.

把光强分离变量, 有

$$I = I^{rad}(r, \cdot) I^{rad}(z) \quad (3)$$

光功率可表示为

$$P(z) = 2 \int_0^{\cdot} I(r, z) r dr = I(r, z) \quad (4)$$

将式(1), (2)对 z 积分, 由式(3), (4), 可得到

$$\frac{dP_p}{dz} = -\rho P_p - \frac{s}{p} \frac{g_R(\cdot)}{A_{eff}^R} P_p P_s \quad (5)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -s P_s + \frac{g_R(\cdot)}{A_{eff}^R} P_p P_s \quad (6)$$

式中 $A_{eff}^R = \frac{I_p^{rad} \cdot I_s^{rad}}{I_p^{rad} I_s^{rad}}$ 为喇曼模有效面积.

收稿日期: 2003-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(69878023, 60277026)

资助

作者简介: 温国斌(1978 -), 男, 硕士研究生.

假设信号光功率很低,则由其产生的喇曼散射可忽略,式(5)右边的第2项也可以忽略,得到

$$\frac{dP_p}{dz} = -\gamma_p P_p$$

将上式对 z 积分,得到 $P_p = P_p(0) e^{-\gamma_p z}$

将上式代入式(6),得到

$$\frac{dP_s}{dz} = -\gamma_s P_s + \frac{g_R(\omega)}{A_{eff}^R} [P_p(0) e^{-\gamma_p z}] P_s \quad (7)$$

将式(7)对 z 积分,得到

$$P_s(L) = P_s(0) \exp\left[\frac{g_R(\omega)}{A_{eff}^R} P_p(0) L_{eff} - \gamma_s L\right] \quad (8)$$

式中 L 为腔长, $L_{eff} = \frac{1}{\gamma_p} (1 - e^{-\gamma_p L})$ 为有效长度,

在此光学微球腔喇曼激光器当中,有: $L_{eff} = \frac{1}{\gamma_p}$ 把

$L_{eff} = \frac{1}{\gamma_p}$ 的近似值带入式(8)中,得到

$$P_s(L) = P_s(0) \exp\left[\frac{g_R(\omega)}{A_{eff}^R} P_p(0) \frac{1}{\gamma_p} - \gamma_s L\right] \quad (9)$$

在一个半径为 a 的光学微球腔喇曼激光器中,周长 $L = 2\pi a$,信号光在球内表面沿球的大圆绕行一周回到同一个位置时,在增益等于损耗的阈值情况下,有 $P_s(L) = P_s(0)$,代入式(9),得到

$$\exp\left[\frac{g_R(\omega)}{A_{eff}^R} P_p(0) \frac{1}{\gamma_p} - \gamma_s L\right] = 1$$

化简整理,得到 $P_p(0) = \frac{\gamma_p L A_{eff}^R}{g_R(\omega)}$

此时正是阈值情况,有 $P_p(0) = P_{th}$,由 $V_{eff}^R = LA_{eff}^R$ 为喇曼模的有效体积,则有

$$P_{th} = P_p(0) = \frac{\gamma_p}{g_R(\omega)} \cdot V_{eff}^R \quad (10)$$

考虑喇曼模的有效体积和泵浦模有效体积间的关系 $V_{eff}^p = V_{eff}^R \cdot \beta$ (式中 $\beta < 1$,为喇曼模和泵浦模的空间模重叠因数);考虑到由于内部反向散射产生的循环功率的修正因数 B ,得到

$$P_{th} = \frac{1}{B} \frac{\gamma_p}{g_R(\omega)} V_{eff}^p \quad (11)$$

以上是小球内部的阈值情况,考虑光由光纤耦合进入球微腔的损耗 γ_c ,得到

$$P_{th} = \frac{1}{B} \frac{\gamma_p}{g_R(\omega)} V_{eff}^p \frac{\gamma_c}{\gamma_p} \quad (12)$$

由 $\gamma_c L = \gamma_p L_c$, $Q = 2 \frac{L}{L_c}$,再由式(12)推得

$$P_{th} = \frac{2n^2}{pR} \frac{V_{eff}^p}{Bg} Q_c^p \left(\frac{1}{Q_T^p}\right)^2 \frac{1}{Q_T^R} \quad (13)$$

式中 n 为折射率, V_{eff}^p 为泵浦模有效体积, p 为泵浦光波长, R 为喇曼光波长; g 为非线性材料喇曼增益系数; $B = 4B'$ 是由于内部反向散射产生的循环功率的修正因数(0.5 ~ 1); Q_T^p 为泵浦模的总品质因数,由本征贡献 Q_0^p 和耦合贡献 Q_c^p 组成, Q_T^R 为喇曼模的品质因数. 方程(13)有很重要的特性:阈值泵浦功率 P_{th} 与因数 $\frac{Q_c^2}{V}$ 的关系为 $P_{th} \propto \left(\frac{Q_c^2}{V}\right)^{-1}$, 而 $\frac{Q_c^2}{V}$ 正好是品质因数 Q 与腔的 Purcell 因数 $\left(\frac{Q}{V}\right)$ 的乘积. 因此品质因数在器械运行中起着重要的作用. 下面的分析也就围绕着品质因数进行.

2 讨论和分析

上面导出了微球喇曼激光器的阈值公式,下面首先从泵浦光的耦合 Q 值入手,研究熔锥光纤和球微腔的耦合间距对激光器阈值的影响;接着分析耦合间距和光纤耦合到球微腔的峰值耦合因子的关系,从而得出激光器阈值和峰值耦合效率的对应关系. 最后,我们用得到的对应关系讨论可以提高微球喇曼激光器效率的可能方法.

2.1 阈值与耦合间距之间的关系

为了研究阈值对品质因数的依赖性,我们改变熔锥光纤和微球之间的耦合间距,以此来测量阈值对耦合品质因子的依赖情况. 要改变熔锥光纤与微球之间的耦合间距,可以通过改变它们之间的气体间距来完成. 根据式(13),在 $Q_T^p = Q_T^R$ 的条件下,式(13)整理得到

$$P_{th} = \frac{2n^2}{pR} \frac{V_{eff}^p}{Bg} Q_c^p \left(\frac{Q_0^p + Q_c^p}{Q_0^p Q_c^p}\right)^3 \quad (14)$$

考虑光纤和球微腔的耦合间距对阈值的影响,把 $Q_c^p \approx \frac{16\sqrt{2}}{9} \frac{n_s^4 n_c (n_s^2 - 1)^2}{(n_c^2 - 1)} \frac{a^3 b^3}{2} \times \exp[2d +$

$(l - a)^2 / a^2]^{1/3}$ (其中 n_s, n_c, a, b, l, d , 分别是微球的折射率、熔锥的折射率、微球的半径、熔锥的半径、泵浦光的波长、角量子数、微球和熔锥的耦合间距、微球的传播常数,常数 $\approx k \sqrt{n_s^2 - 1}$, k 是光纤的传播常数),代入式(14)中,并画出阈值随耦合间距变化的理论曲线(如图1所示),近似为抛物线的形状,其最小的阈值泵浦功率为 50 μ W. 图上 x 轴的零点是临界耦合^[6]点时的耦合间距,有关临界耦合方面的计算见下一节.

2.2 峰值耦合效率和耦合间距之间的关系

下面讨论熔锥光纤和球微腔的耦合效率问题.

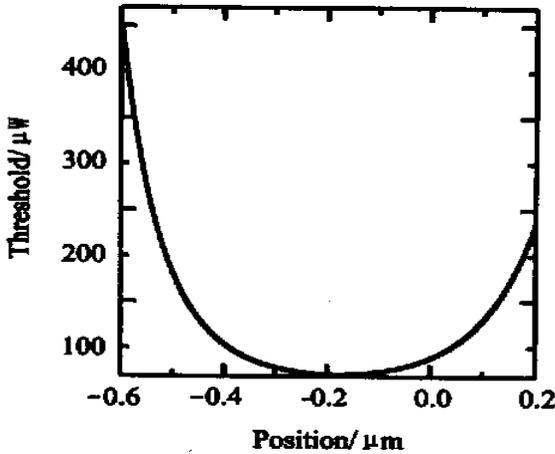


图 1 激光器阈值和耦合间距的关系

Fig. 1 The relationship between threshold and sphere-fiber distance

熔锥和微球之间的耦合效率^[4,6] $C = 1 - T$, T 为传输透射系数, $C = \frac{C}{1 + F \sin^2(\phi/2)}$ ($F = \frac{4}{1 - t}$, 是系统总的损耗因子, ϕ 是相移, 与球的非线性介质有关). 要让光纤对球微腔有最大的能量注入, 首先要调节泵浦光波长, 使得球微腔和熔锥光纤之间的耦合效率最大(见图 2 上的峰值点), 然后要使峰值耦合效率最大, 即达到临界耦合, 而峰值耦合效率主要是跟熔锥光纤和球微腔之间的耦合间距有关的. 由峰值耦合效率的公式^[4]:

$$C = \frac{[1 - \exp(-L)] t^2}{[1 - \exp(-L/2)] \sqrt{1 - t^2}} \quad (15)$$

其中 $t^2 = t_0^2 \exp[-2\alpha d]$ (16)

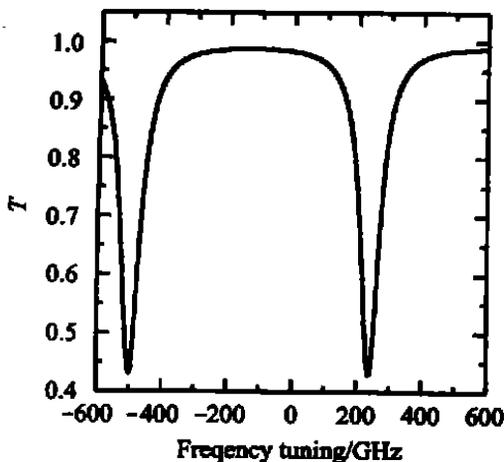


图 2 微球-熔锥系统的典型传输谱线(简并情况) 横轴为光纤中的光频率, 纵轴为透射系数 T

Fig. 2 Spectrum of the coupling system

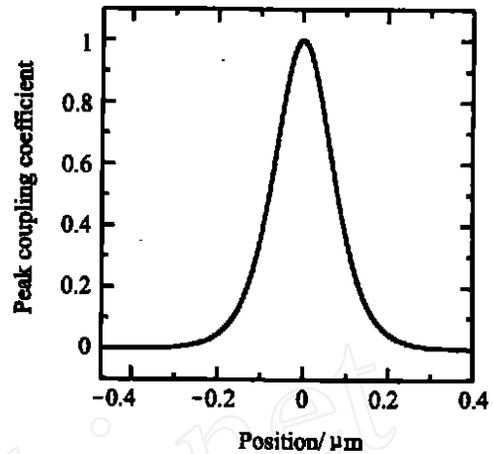


图 3 峰值耦合效率和耦合间距的关系

Fig. 3 Peak coupling efficiency as a function of sphere-fiber distance

t 是实振幅耦合系数(α 是衰减常数, t_0 是 $d = 0$ 时的实振幅耦合系数, 它与很多参数有关^[4]), α 是微球的损耗系数. 在 $t_0^2 \ll L$ 的条件下, 画出峰值耦合效率和耦合间距的关系图(图 3), 图上的峰值点对应临界耦合点, 而且图 1, 3 上的 x 轴零点相对应.

2.3 峰值耦合效率和喇曼激光器阈值的对应关系与激光器的性能改进研究

从式(14) 可以知道提高球微腔的本征 Q 值会起到降低激光器阈值提高其性能的作用, Q 值为 10^9 微球已经研制成功, 但如果要在现有的球微腔 (Q 值为 10^8) 的基础上提高系统效率, 则可以考虑耦合 Q 值. 值得注意的是, 虽然临界耦合点^[6] 处的循环泵浦功率(喇曼增益) 最大, 但最小的阈值并不在临界耦合点. 最小的阈值泵浦功率发生在系统耦合不足的情况下, 此时的泵浦传输率为 12% (参考图 2). 因此, 如果找到可以提高循环泵浦效率的方法, 就可以提高激光器的效率. 由式(14) 发现当泵浦光的中心频率作出一定调谐时, 最低阈值点对应的耦合间距也相应作出变化, 而式(16) 中的 t_0 与泵浦光的波长 λ 成正比, 故当调谐量不太大时, t_0 对波长变化不太敏感, 因此可通过对波长调谐来提高泵浦光传输效率. 由我们对临界耦合的研究, 考虑非简并情况, 假设泵浦光的波长都在耦合峰上时, 当泵浦光的波长为 $1.545 \mu\text{m}$ 时, $C = 0.1136$; 当泵浦光的波长为 $1.555 \mu\text{m}$ 时, $C = 0.1262$ (而且波长在这范围小幅度增大时, 由于 Q_c^p 和阈值都与波长成反比, 因此同一耦合间距下的阈值会相应变小), 可

见提高是有限的,而且受到很多条件的限制。

因此,要进一步改进激光器的性能,可以考虑将临界耦合点对应的耦合间距减小,从而使得临界耦合点与最小阈值点相对应或者相接近。由式(15)可以作出一定的近似,使得峰值耦合效率可以表示为

$$C = \frac{4 L \exp(-2 \alpha_0 d)}{t_0^2 (\exp(-2 \alpha_0 d) + L/t_0^2)^2} \quad (14)$$

从该式可知在 $t_0^2 = L$ 时,峰值耦合效率在 $d = \ln(t_0^2/L)/2\alpha_0$ 时到达最大(即达到临界耦合),由文献[4]知在光纤锥角增大到一定程度时, t_0^2 随着光纤锥角的增大而减少,从式 $d = \ln(t_0^2/L)/2\alpha_0$ 知, t_0^2 减少则临界耦合对应的耦合间距也相应减小。因此在保持激光器有小阈值的前提下,只要改变熔锥光纤的锥角就有可能使得在临界耦合时把能量从光纤注入到球微腔(也就是泵浦能量的 100% 注入),从而可以根据我们的需要调节系统的泵浦能量的注入量。

3 结 论

本文从推导微球喇曼激光器的阈值公式出发,讨论了该激光器阈值与微球和光纤的耦合距离的关系,并对峰值耦合因子和耦合间距的关系进行了分析。分析表明,由于最低阈值点和临界耦合点^[6]的分离,导致在最低阈值点时光纤到微球的功率传输效率只有百分之十几。通过对泵浦光中心频率的调

节可以使功率传输效率有一定程度的提高,而要进一步提高系统的能量输入效率则要调节与球微腔耦合的熔锥光纤的锥角,而提高系统的输出效率则要利用双熔锥光纤的微球腔耦合系统。总的来说,通过理论计算与数值模拟,我们从该激光器系统的输入和输出结构的改进角度提出了提高微球喇曼激光器性能的方法。

参考文献:

- [1] Braginsky V B, Gorodetsky M L, Ilchenko V S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes[J]. Phys. Lett. A, 1989, 137: 393 - 396.
- [2] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity[J]. Nature, 2002, 415(7): 621 - 623.
- [3] Gorodetsky M L, Ilchenko V S. Optical microsphere resonators: optimal coupling to high-Q whispering-gallery modes[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1999, 16(1): 147 - 154.
- [4] 陆颖,王吉有,徐晓轩,等.微球与锥形光纤耦合系统的光学特性[J].南开大学学报,2000,33(4):6 - 10.
- [5] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. San Diego: Academic Press, 1995.
- [6] Cai M, Painter O, Vahala K J. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 74 - 77.

Performance Improvement of Raman Laser Using a Microsphere Cavity

WEN Guo-Bin, YANG Li, LIU Li-sa, CAI Zhi-ping
(Dept. of Phys., Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: Raman lasers consisting of microsphere coupled to a tapered fiber greatly reduce threshold and enhance efficiency. This paper investigates performance of the Raman laser theoretically in detail. Firstly it deals with deducing the equation for pump threshold in microspherical Raman lasers based on rate equations in considering simultaneously pump and Raman signals. Then, we investigate characteristics of coupling between microsphere and tapered fiber, and the threshold dependence on coupling is considered. Some propositions for improving the efficiency of microspherical Raman lasers are also discussed. Totally, based on theoretical simulation, we try to enhance performance of Raman lasers by improving its system of coupling.

Key words: microsphere cavity; Raman laser; threshold; tapered fiber