

文章编号: 0253-2239(2009)03-0632-06

铒镱共掺微环谐振器的放大特性分析

汪玉海 马春生 闫欣 张大明

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 吉林 130012)

摘要 对铒镱共掺微环谐振器的放大特性进行了理论分析, 给出了器件的传递函数和功率增益的公式。在抽运光波长为 $0.98 \mu\text{m}$ 、信号光中心工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的情况下, 分析了抽运光功率、信号光功率、铒镱掺杂浓度、微环与信道间的振幅耦合比率对放大器放大特性的影响, 给出了上下信道的传输光谱, 并对其结构进行了优化设计。模拟结果表明, 与同等长度的直条形铒镱共掺波导放大器相比, 该器件可获得更高的信号光增益, 选取 $P_{p0} = 8 \text{ mW}$, $P_{s0} = 36.5 \mu\text{W}$, $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}} = 3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ 时, 该器件可容易地获得 11.6 dB 以上甚至高达 60 dB 的信号光功率增益。这种强放大功能的铒镱共掺微环谐振型放大器, 将更有利于器件在尺寸上的小型化、集成化。

关键词 微环谐振器; 波导放大器; 铒镱共掺; 传输光谱

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0632

Analysis on Amplifying Characteristic of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped Microring Resonators

Wang Yuhai Ma Chunsheng Yan Xin Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract For an $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped microring resonator, formulas of the transfer function and output power gain are presented, transmission characteristics are analyzed, and simulation is performed. Around the pumping wavelength of $0.98 \mu\text{m}$ and the central signal wavelength of $1.55 \mu\text{m}$, the effects of the pump power, signal power, dopant concentration and amplitude coupling ratio on the output power gain are investigated, the transmission spectra are presented and the optimization of the device is carried out. Simulated results show that the output power gain of this device is much larger than those of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped straight waveguide amplifier with the same waveguide length. In the case of the pump power of 8 mW , signal power of $36.5 \mu\text{W}$, Er^{3+} ion concentration of $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, and Yb^{3+} ion concentration of $3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, the signal power gain of the device can reaches 11.6 dB and even 60 dB . Also, this device is propitious to the denser integration in the opto-electronic circuits.

Key words microring resonator; waveguide amplifier; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doping; transmission spectrum

1 引言

近年来,微环谐振器已引起国内外研究者的高度重视。微环谐振器具有成本低、结构紧凑、集成度高、插入损耗小、串扰低等优点,在滤波^[1~3]、波分复用^[3~5]、调制^[6]、开关^[7]、传感^[8]和激光^[9]等方面都具有广泛的应用。

在某些材料基质中进行铒镱共掺,由于掺入的 Yb^{3+} 能包围 Er^{3+} 形成 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对, Yb^{3+} 能够把吸收的能量通过离子对充分转移给 Er^{3+} , 使 Er^{3+} 达到粒子数反转。 Yb^{3+} 为 Er^{3+} 提供了一种高效的间接抽运方式,改善了波导的性能,提高了信号光的增益。

本文所要讨论的铒镱共掺微环谐振器对信号光

收稿日期: 2008-08-13; 收到修改稿日期: 2008-09-08

基金项目: 国家 973 计划 (2006CB302803) 和国家自然科学基金 (60507004) 资助课题。

作者简介: 汪玉海 (1976-), 男, 博士研究生, 主要从事光电子器件分析模拟和优化设计方面的研究。

E-mail: yuhai.wang@yahoo.com.cn

导师简介: 马春生 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导波光学和光电子学方面的研究。

E-mail: mcsheng@163.com

不仅具有滤波功能还具有放大功能。其设计思想是在信道和微环的波导芯中掺入铟镓，波长为 $0.98 \mu\text{m}$ 的抽运光与中心工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 复信号光从上信道输入端口输入后，在邻近微环时要发生相互耦合，其结果使波长为 $0.98 \mu\text{m}$ 与 $1.55 \mu\text{m}$ 的光因满足谐振条件而在微环中引起谐振，同时抽运光经铟镓共掺把能量转移给信号光，耦合进入上、下信道的信号光的输出光强得以增强，从而实现了滤波功能与放大功能。

本文对结构最简单的铟镓共掺平行信道单环谐振器的放大特性进行了理论分析，给出了器件的传递函数和功率增益公式。在谐振波长为 $0.98 \mu\text{m}$ 与 $1.55 \mu\text{m}$ 的情况下，对这种器件的放大特性进行了数值模拟，并对模拟结果进行了适当的讨论。

2 传递函数和功率增益

平行信道单环谐振器的结构如图 1 所示，在上下信道及微环中进行铟镓共掺。令微环半径为 R ，两信道的长度相等，各为 $2L$ ， L 为信道端口到耦合点的距离。适当选择微环的半径可尽量地减小波导弯曲对模传播常数的影响，并可尽量地减小因微环弯曲引起的辐射损耗，因此可令信道和微环中的模式具有相同的传播常数 β 、损耗系数 α 和增益系数 g ，即信道和微环的复传播常数均为 $\beta - j\alpha + jg$ 。令 κ 为微环与信道间的振幅耦合率， t 为相应的振幅透射率， a_i 、 b_i 分别为通过微环和信道中心耦合点时信号光的输入和输出振幅，并满足下述关系

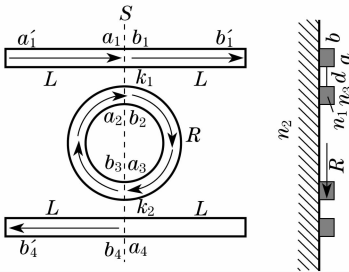


图 1 平行信道单环谐振器的结构简图与截面图

Fig. 1 Diagram and sectional view of a microring resonator with parallel channels

$$a_2 = b_3 \exp(-j\phi), \quad \phi = \pi R(\beta - j\alpha + jg), \quad (1)$$

$$a_3 = b_2 \exp(-j\phi), \quad (2)$$

$$b_1 = ta_1 - j\kappa a_2 = ta_1 - j\kappa b_3 \exp(-j\phi), \quad (3)$$

$$b_2 = -j\kappa a_1 + ta_2 = -j\kappa a_1 + tb_3 \exp(-j\phi), \quad (4)$$

$$b_3 = ta_3 - j\kappa a_4 = tb_2 \exp(-j\phi) - j\kappa a_4, \quad (5)$$

$$b_4 = -j\kappa a_3 + ta_4 = -j\kappa b_2 \exp(-j\phi) + ta_4, \quad (6)$$

$$a_4 = 0. \quad (7)$$

联立方程(1) ~ (7)求解可得

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{t[1 - \exp(-j2\phi)]}{1 - t^2 \exp(-j2\phi)}, \quad (8)$$

$$\frac{b_4}{a_1} = -\frac{\kappa^2 \exp(-j\phi)}{1 - t^2 \exp(-j2\phi)}. \quad (9)$$

信号光在上信道的输入/输出端口处的输入/输出振幅及在下信道的输出端口处的输出振幅分别为

$$a'_1 = a_1 \exp(j\psi), \quad \psi = L(\beta - j\alpha + jg), \quad (10)$$

$$b'_1 = b_1 \exp(-j\psi), \quad (11)$$

$$b'_4 = b_4 \exp(-j\psi). \quad (12)$$

利用(8)式~(12)式，可以得到信号光由上信道输入端口至输出端口的光强传递函数 $|B|^2$ 和由上信道输入端口至下信道输出端口的光强传递函数 $|D|^2$ 分别为

$$|B|^2 = \left| \frac{b'_1}{a'_1} \right|^2 = \left| \frac{b_1 \exp(-j\psi)}{a_1 \exp(j\psi)} \right|^2 = \left| \frac{t[1 - \exp(-j2\phi)] \exp(-j2\psi)}{1 - t^2 \exp(-j2\phi)} \right|^2, \quad (13)$$

$$|D|^2 = \left| \frac{b'_4}{a'_1} \right|^2 = \left| \frac{b_4 \exp(-j\psi)}{a_1 \exp(j\psi)} \right|^2 = \left| \frac{\kappa^2 \exp[-j(\phi + 2\psi)]}{1 - t^2 \exp(-j2\phi)} \right|^2. \quad (14)$$

相应的上信道和下信道输出信号光的功率增益分别定义为

$$G_B(\text{dB}) = 10 \lg |B|^2,$$

$$G_D(\text{dB}) = 10 \lg |D|^2. \quad (15)$$

当 $G_B, G_D > 0$ 时，器件呈现放大功能；当 $G_B, G_D < 0$ 时，器件处于损耗状态。

稳态情况下，通过求解速率方程和传输方程，可以得到长度为 z 的直条形的铟镓共掺波导的功率增益 $G(z)$ 满足的超越方程为^[10]

$$[G(z)]^\alpha \exp(-\alpha \Gamma_s \sigma N_{\text{Er}} z) = 1 - \frac{\nu_p P_{s0}}{\nu_s P_{p0}}$$

$$[G(z) - 1] - \frac{\ln G(z) + \Gamma_s \sigma_{12} N_{\text{Er}} z}{B \Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{21})} \frac{A_c h \nu_p}{P_{p0}}, \quad (16)$$

式中

$$G(z) = \frac{P_s(z)}{P_{s0}},$$

$$\alpha = \frac{\Gamma_p \sigma_{13} + \Gamma_p (\sigma_{45} + \sigma_{54}) (1 - \eta_0)}{\Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{21}) \eta_0}, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{\sigma_{13} + (\sigma_{45} + \sigma_{54}) (1 - \eta_0)} \left(\sigma_{13} + \sigma_{45} \frac{N_{\text{Yb}}}{N_{\text{Er}}} \right) - \sigma_{12},$$

$$B = \frac{\tau_{21} \tau_{54}}{\tau_{54} + \tau_{21}} \frac{(1 - \eta_0)}{\eta_0}. \quad (18)$$

$\Gamma_{p,s}$ 为波导的光功率限制因子; A_c 为波导芯横截面积; $\sigma_{12}(\nu_s)$ 、 $\sigma_{21}(\nu_s)$ 分别为 Er^{3+} 对频率为 ν_s 的信号光的吸收和发射截面; $\sigma_{13}(\nu_p)$ 为 Er^{3+} 对频率为 ν_p 的抽运光的吸收截面; $\sigma_{45}(\nu_p)$ 、 $\sigma_{54}(\nu_p)$ 分别为 Yb^{3+} 对频率为 ν_p 的抽运光的吸收和发射截面; η_0 为初始能量转移效率。 N_{Er} 为 Er^{3+} 的总浓度; N_{Yb} 为 Yb^{3+} 的总浓度。 P_{p0} 、 P_{s0} 分别为波导端面 $z=0$ 处输入的抽运光功率及信号光功率。 h 为普朗克常数。数值求解方程(16)则可得到增益 $G(z)$, 进而得到模式的增益系数 $g=G(z)/2z$, 然后利用式(15)则可对器件的放大特性进行分析与模拟。

3 计算结果及讨论

器件采用磷酸盐玻璃基质, 相关参数值选取如下^[10~12]: 在波长 $0.98 \mu\text{m}$ 下, Er^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{13} = 2.58 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, Yb^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{45} = 1.0 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, Yb^{3+} 的发射截面 $\sigma_{54} = 1.0 \times 10^{-24} \text{ m}^2$; 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 下, Er^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{12} = 6.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,

表 1 微环和信道的参数优化值

Table 1 Optimized parameters of the microring resonator

Core width μm	$a=1.7$	Pump power /mW	$P_{p0} = 8$
Core thickness μm	$b=1.7$	Signal power μW	$P_{s0} = 36.5$
Overlapping factor of pump	$\Gamma_p=0.96$	Yb^{3+} concentration m^{-3}	$N_{\text{Yb}} = 3 \times 10^{27}$
Overlapping factor of signal	$\Gamma_s=0.87$	Er^{3+} concentration m^{-3}	$N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{26}$
Radius of microring μm	$R=15.2$	Amplitude coupling ratio	$\kappa=0.092$
Resonant order of pump	$m_p=145$	Propagation loss coefficient / (dB/cm)	$2\alpha=0.5$
Resonant order of signal	$m_s=89$	Length of each channel μm	$2L=15000$

图 2 显示了微环和信道 E_{mm}^y 导模的有效折射 N 随芯厚度 b 的变化曲线。取谐振波长 $\lambda_p=0.98 \mu\text{m}$, $\lambda_s=1.55 \mu\text{m}$, 芯宽度与芯厚度相等, 即 $a=b$ 。可以看出, 为了实现信道和微环中 E_{00}^y 信号光主模的单模传输, 可取 $a=b=1.7 \mu\text{m}$ 。

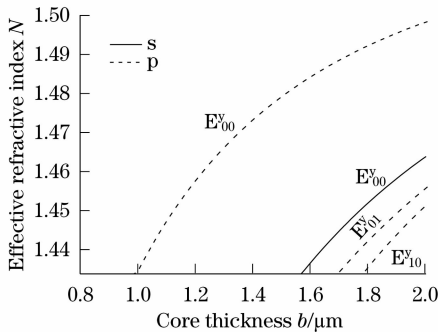


图 2 有效折射 N 随芯厚度 b 的变化, 取 $a=b$

Fig. 2 Effective refractive index N versus the core thickness b , where $a=b$

Er^{3+} 的发射截面 $\sigma_{21} = 9.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$; Er^{3+} 在 $^4I_{13/2}$ 能级上的寿命 $\tau_{12} = 10 \text{ ms}$; Yb^{3+} 在 $^2F_{5/2}$ 能级上的寿命 $\tau_{54} = 2 \text{ ms}$; 初始能量转移效率 $\eta_0 = 11.5\%$; 波导芯的折射率 $n_1 = 1.52812$, 下包层的折射率 $n_2 = 1.4338$, 上包层及左右包层的折射率 $n_3 = 1$ 。

为了在器件中实现抽运光和信号光的单模传输并获得良好的放大特性, 首先对器件的相关参数进行优化, 第一步, 当抽运光和信号光在器件中单模传输时, 确定出波导的芯宽度、芯厚度及传播常数, 并可求出抽运光和信号光的功率限制因子。第二步, 适当选择微环的半径, 使得抽运光和中心波长信号光的谐振级数 m_p 、 m_s 尽可能地同时分别接近整数, 以满足微环谐振条件并在微环中发生谐振, 同时要使因微环弯曲引起的辐射损耗尽量的小。第三步, 根据(15)式确定出影响器件增益的各个参量。所得的参数优化值由表 1 给出, 其中的下标 p、s 分别标记抽运光和信号光。首先对器件的参量进行优化。

图 3 显示了振幅耦合比率 κ 随波导间距 d 的变化曲线, 所用公式见文献[13]。由图可见, 振幅耦合比率 κ 随波导间距 d 的减小而迅速增大。当波导间距 d 减小到零时, 相应的振幅耦合比率 κ 约为 0.28。因此振幅耦合比率 κ 不能取得过大, 否则微

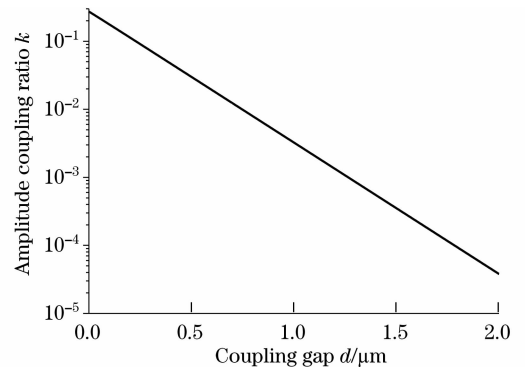


图 3 振幅耦合比率 κ 随间距 d 的变化, 取 $a=b=1.7 \mu\text{m}$

Fig. 3 Amplitude coupling ratio κ versus the central coupling gap d , with $a=b=1.7 \mu\text{m}$

环与信道间的波导间距 d 将会过小,这将增大器件工艺制作上的难度。计算结果表明,选取振幅耦合比率 $\kappa=0.092$,此时微环与信道间的间距 d 约为 $0.247 \mu\text{m}$,这一数值可以在器件工艺制作上实现。在以下的计算中,选取振幅耦合比率 κ 在 $0\sim 0.2$ 范围内变化。

在以下的模拟中,取材料的功率传输损耗系数 $2\alpha=0.5 \text{ dB/cm}$,包含了材料的吸收损耗和由波导侧壁的不光滑而引起的散射损耗。取信道端口到耦合点的距离 $L=7500 \mu\text{m}$,微环半径 $R=15.2 \mu\text{m}$,此时的功率弯曲损耗系数约为 $3.9\times 10^{-4} \text{ dB/cm}$,与功率传输损耗系数相比已经很小,可以忽略。

从(13)式~(15)式可以看出,器件的功

率增益 G_B, G_D 与振幅耦合比率 κ 和模增益系数 g 有关,从(16)式又可看出,模增益系数 g 与抽运光功率 P_{p0} 、信号光功率 P_{s0} 、钇离子浓度 N_{Er} 及铒离子浓度 N_{Yb} 有关,因此应适当选择 $\kappa, P_{p0}, P_{s0}, N_{\text{Er}}$ 和 N_{Yb} 的值以获得最大的功率增益 G_B, G_D 。经过对以上参量的多次优化选择,最后的优化值为: $\kappa=0.092$ (对应的 $d=0.247 \mu\text{m}$)、 $P_{p0}=8 \text{ mW}$ 、 $P_{s0}=36.5 \mu\text{W}$ 、 $N_{\text{Yb}}=3\times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_{\text{Er}}=1\times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, (对应的 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}=30$)。下面对器件的增益放大特性进行分析。

图4显示了上信道和下信道输出信号光的功率增益 G_B, G_D 随振幅耦合比率 κ 、输入抽运光功率 P_{p0} 的变化。图中出现了梳状的增益峰。当选取 $\kappa=0.092, P_{p0}=8 \text{ mW}$ 时,可以获得最大的功率增益。

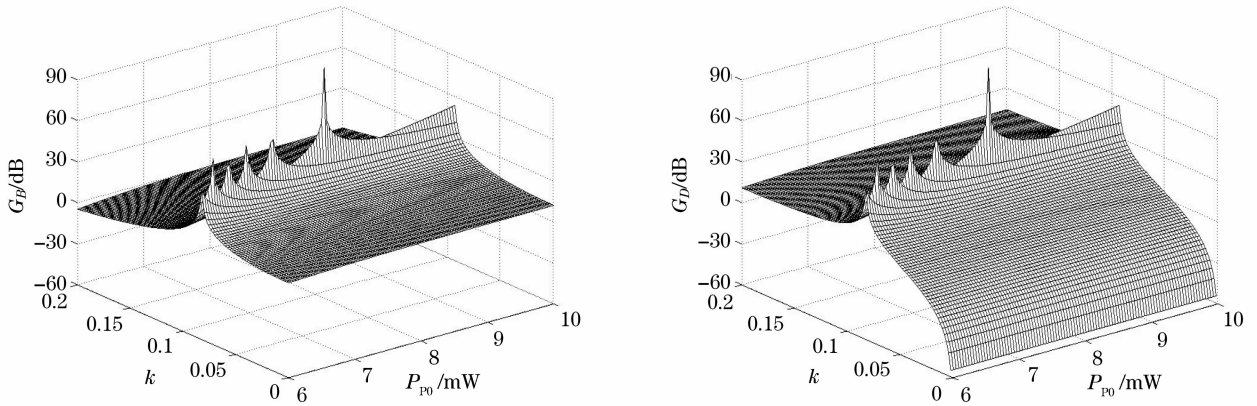


图4 (a)上信道和(b)下信道输出信号光的功率增益 G_B, G_D 随振幅耦合比率 κ 、输入抽运光功率 P_{p0} 的变化,

取 $\lambda_s=1.55 \mu\text{m}, P_{s0}=36.5 \mu\text{W}, N_{\text{Er}}=1\times 10^{26} \text{ m}^{-3}, N_{\text{Yb}}=3\times 10^{27} \text{ m}^{-3}$

Fig. 4 Output power gains G_B and G_D of (a) the upper and (b) lower channels versus the amplitude coupling ratio κ and the pump power P_{p0} , where $\lambda_s=1.55 \mu\text{m}, P_{s0}=36.5 \mu\text{W}, N_{\text{Er}}=1\times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, and $N_{\text{Yb}}=3\times 10^{27} \text{ m}^{-3}$

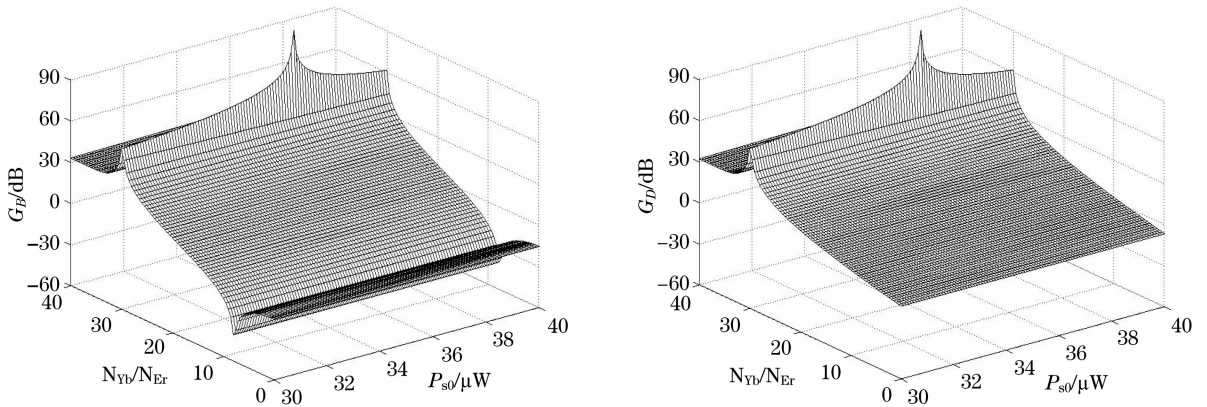


图5 (a)上信道和(b)下信道输出信号光的功率增益 G_B, G_D 随铒掺杂比率 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 、输入信号光功率 P_{s0} 的变化,

取 $\lambda_s=1.55 \mu\text{m}, \kappa=0.092, P_{p0}=8 \text{ mW}, N_{\text{Er}}=1\times 10^{26} \text{ m}^{-3}$

Fig. 5 Output power gains G_B and G_D of (a) the upper and (b) lower channels versus the Yb-Er co-dopant ratio

$N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ and the signal power P_{s0} , where $\lambda_s=1.55 \mu\text{m}, \kappa=0.092, P_{p0}=8 \text{ mW}$, and $N_{\text{Er}}=1\times 10^{26} \text{ m}^{-3}$

图5显示了上信道和下信道输出信号光的功率增益 G_B, G_D 随铒掺杂比率 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 、输入信号光

功率 P_{s0} 的变化。从图中可看出,增益峰只在 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}=30, P_{s0}=36.5 \mu\text{W}$ 附近出现,从而形成了最

大的功率增益。

图 6 显示了上信道和下信道输出信号光的功率增益 G_B 、 G_D 随传输波长 λ 、信号光功率 P_{s0} 的变化(即传输光谱)。传输波长 λ 的范围取为 1.5495 ~

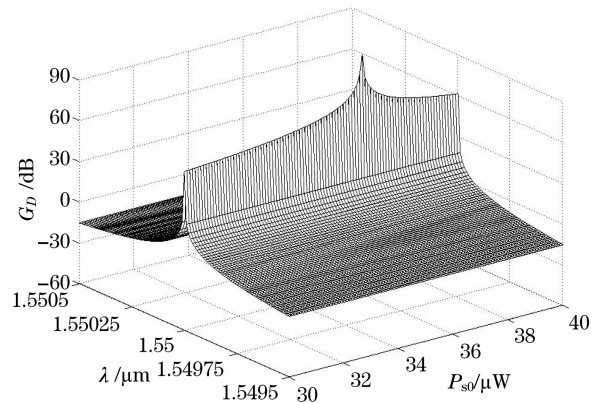
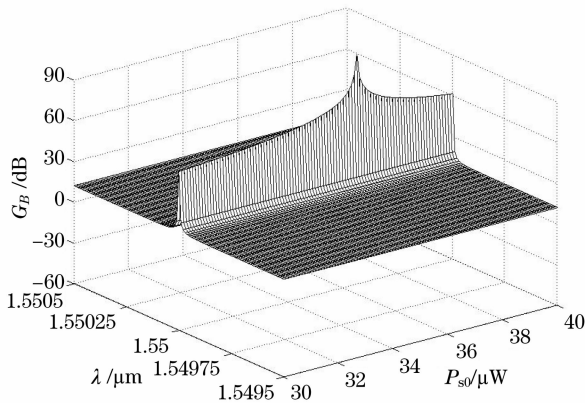


图 6 (a)上信道和(b)下信道输出信号光的功率增益 G_B 、 G_D 随传输波长 λ 、输入信号光功率 P_{s0} 的变化(即传输光谱),

$$\text{取 } \kappa = 0.092, P_{p0} = 8 \text{ mW}, N_{Er} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}, N_{Yb} = 3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$$

Fig. 6 Output power gains G_B and G_D of (a) the upper and (b) lower channels versus the wavelength λ and the signal power P_{s0} , where $\kappa = 0.092$, $P_{p0} = 8 \text{ mW}$, $N_{Er} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, and $N_{Yb} = 3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$

在图 4~图 6 中增益峰的出现是由于抽运光和中心波长信号光在微环中以较高的功率进行谐振, Yb^{3+} 把吸收的能量通过 $\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$ 离子对充分转移给 Er^{3+} , 使 Er^{3+} 几乎全部实现了粒子数反转, 从而出现了最大增益。由图 6 还可看出, 上信道信号光的传输光谱在整个波长变化范围内皆为正增益, 下信道信号光的传输光谱在中心波长 1.55 μm 附近为正增益, 而在远离中心波长时会出现负增益, 因此在实际应用中应选择上信道进行信号光放大, 选择下信道进行中心波长信号光滤波。综合以上分析可以看到, 即使是在较小的抽运光功率和信号光功率下, 这种微环谐振放大器也很容易地获得 10 dB 以上的信号光功率增益。在精确的优化参数下, 如选取 $\lambda_s = 1.55 \mu\text{m}$, $P_{p0} = 8 \text{ mW}$, $P_{s0} = 36.5 \mu\text{W}$, $N_{Er} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{Yb} = 3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, 甚至可以获得高达 60 dB 的信号光峰值功率增益。

4 结 论

将钕镱共掺系统应用到单环谐振器上, 该器件对信号光可以同时信号光有滤波和放大功能。选取 $P_{p0} = 8 \text{ mW}$, $P_{s0} = 36.5 \mu\text{W}$, $N_{Er} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{Yb} = 3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ 时, 该器件可容易地获得 11.6 dB 以上甚至高达 60 dB 的信号光功率增益。这是因为微环对耦合进入的抽运光和信号光进行了能量储存, 使得 Yb^{3+} 把吸收的能量通过 $\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$ 离子

1.5505 μm 。可以看出, 增益峰只在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $P_{s0} = 36.5 \mu\text{W}$ 附近出现, 从而形成了最大的功率增益。

对充分转移给 Er^{3+} , 使 Er^{3+} 几乎全部实现了粒子数反转, 从而形成了强大的放大功能。这种钕镱共掺微环谐振型放大器将在尺寸上更利于器件小型化、集成化。本文对钕镱共掺微环谐振器的放大特性进行的探索性研究及得到的初步结果还未见有文献报道。

参 考 文 献

- 1 L. J. Zhou, A. W. Poon. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9194~9204
- 2 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Filtering characteristics of series-coupled double-ring optical microresonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1191~1195
杨建义, 江晓清, 王明华. 串联双环光微谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- 3 Gao Zhensen, Li Chunfei. Optical properties of the series-coupled microring resonators[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(5): 675~679
高震森, 李淳飞. 串联微环谐振器的光学特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 675~679
- 4 B. E. Little, S. T. Chu, P. P. Absil *et al.*. Very high-order microring resonator filters for WDM applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2263~2265
- 5 Wang Xianyin, Ma Chunsheng, E Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 45~50
王现银, 马春生, 鄂书林等. 聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 45~50
- 6 M. Balakrishnan, M. Faccini, M. B. J. Diemeer *et al.*. Microring resonator based modulator made by direct photodefinition of an electro-optic polymer [J]. *Appl. Phys.*

- Lett. , 2008, **92**(15): 153310
- 7 M. Waldow, T. Plotzing, M. Gottheil *et al.*. 25ps all-optical switching in oxygen implanted silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(11): 7693~7702
- 8 Z. X. Xia, Y. Chen, Z. P. Zhou. Dual waveguide coupled microring resonator sensor based on intensity detection[J]. *IEEE J. Quant. Electron.* , 2008, **44**(1-2): 100~107
- 9 B. Liu, A. Shakouri, Bowers JE. Passive microring-resonator-coupled lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2001, **79**(22): 3561~3563
- 10 Wang Yuhai, Ma Chunsheng, Li Delu *et al.*. Gain Characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Waveguide Amplifier[J]. *J. Semiconductors*, 2008, **29**(3): 578~582
- 汪玉海,马春生,李德禄等. 铟镱共掺波导放大器的增益特性[J]. *半导体学报*, 2008, **29**(3): 578~582
- 11 A. Shooshtari, T. Touam, S. I. Najafi. Yb^{3+} sensitized Er^{3+} -doped waveguide amplifiers; a theoretical approach[J]. *Opt. Quant. Electron.* , 1998, **30**(4): 249~264
- 12 C. Jiang, Q. J. Zeng. Optimization of erbium-doped waveguide amplifier[J]. *Opt. Laser Technol.* , 2004, **36**(2): 167~171
- 13 C. S. Ma, X. Yan, Y. Z. Xu *et al.*. Characteristic analysis of bending coupling between two optical waveguides [J]. *Opt. Quant. Electron.* , 2005, **37**(11): 1055~1067