

文章编号: 0258-7025(2007)08-1086-06

双抽运光参量放大的增益特性

赵亮, 孙军强

(华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 在相同条件下(如抽运光功率、信号光功率等),与单抽运相比,双抽运光参量放大(OPA)的增益大,增益带宽宽。由于信号光的增益特性与参量增益系数直接相关,因此,在建立高非线性光纤(HNLF)光参量放大的理论模型的基础上,对相位匹配条件、参量增益以及信号光饱和增益的特性进行了分析讨论,采用有限差分法,对增益饱和的特性进行了模拟。结果表明,参量增益和光纤参数、输入抽运光以及信号光的波长、功率有关,而信号光的饱和增益和输入抽运功率有关。

关键词 非线性光学;参量增益;有限差分法;增益饱和

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Gain Characteristics of Dual-Pump Optical Parametric Amplifiers

ZHAO Liang, SUN Jun-qiang

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Under the same conditions, such as the powers of signal and pump, compared with single pump, the dual-pump produces higher optical parametric gain and broader gain bandwidth. As the signal gain characteristics directly interact with the parametric gain parameter, an optical parametric amplification (OPA) model is established based on highly nonlinear fiber (HNLF) with dual-pump, and the characteristics of phase matching condition, parametric gain and signal saturation gain are discussed. The time-domain finite-difference method is adopted to simulate the characteristics of saturation gain. The results indicate that parametric gain is related to fiber parameters, launched pump and signal wavelength and power, while the signal saturation gain is related to pump power.

Key words nonlinear optics; parametric gain; time-domain finite-difference method; gain saturation

1 引言

参量放大是基于极化率为 $\chi^{(2)}$ 材料的一种现象^[1],然而参量放大也可从基于极化率为 $\chi^{(3)}$ 的光纤材料中得到。新的高功率光源和非线性系数高于常规光纤 5~10 倍的高非线性光纤(HNLF)的出现^[2,3],引起了人们对这种光纤光参量放大(FOPA)现象的浓厚兴趣。基于光纤的光参量放大(OPA)只需要几百米长度的高非线性光纤^[4]就可以达到很高的增益,和拉曼放大器(RA)类似,它具有很宽的带宽。一个光参量放大输入一个或者多个抽运光,

前者的带宽在单个抽运光波长附近,而后者的波长带宽在每个输入抽运光波长附近。参量过程可以提供一宽频带的平坦增益谱,但是与拉曼放大器以及掺铒光纤放大器(EDFA)不同,它并不依赖于能量在能级之间的转换来获得增益,而是基于高效率的四波混频效应,通过对四个光子之间的相对相位的控制来获得高增益。光纤光参量放大在密集波分复用(DWDM)系统、全光网等领域将有非常广泛而重要的应用。

前人都是研究简并四波混频效应,带宽窄,增益不高,但最主要的缺点是要在高抽运光功率的情形

收稿日期:2006-12-15;收到修改稿日期:2007-03-29

作者简介:赵亮(1982—),男,湖北人,博士研究生,主要从事光纤通信中非线性效应和光有源器件方面的研究。

E-mail: zhaofuhuilin@sina.com

导师简介:孙军强(1965—),男,浙江人,教授,博士生导师,主要从事新型光纤激光器、基于无源光波导的全光信号处理、微波光子学以及光载无线通信技术等方面的研究。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

下来提高增益,在这种情形下,又会有受激布里渊散射的影响,使得转换效率和增益特性都有所下降。本文提出用双抽运作为抽运源,分析其参量增益特性和饱和增益特性,研究了最佳输入信号光波长和抽运光波长的选取问题,并且给出了相关结论。

2 光参量增益系数

简并四波混频效应已经得到广泛研究,而非简并四波混频的参量放大效应却研究得很少,这里通过以下方案来研究参量增益的特性。如图 1 所示,在光谱仪前面加上带通滤波器是为了滤出信号光,而偏振控制器的作用是为了调节抽运光和信号光的偏振态,以达到最佳的四波混频效果。假定在初始端输入两个强抽运光和一个弱信号光,并且认为在这个过程中,闲频光的初始功率为零,在很小的一段距离就会产生闲频光,其角频率满足: $\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_s + \omega_i$ (下标 p1, p2 代表两个抽运光, s, i 代表信号光和闲频光)。假定沿 x 方向偏振的三束光沿 z 方向传播,其振幅分别为 A_{p1}, A_{p2}, A_s, A_i 。在这个过程中,抽运光和信号光都是连续光,并且忽略走离效应、群速度色散效应(GVD)和高阶色散效应(TOD),由非线性薛定谔(NSL)方程可以得到以下耦合波方程^[5]

$$\begin{aligned} \frac{dA_{p1}}{dz} = & i\gamma[|A_{p1}|^2 + 2(|A_{p2}|^2 + |A_s|^2 + |A_i|^2)]A_{p1} + \\ & 2i\gamma A_{p2}^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_{p1}, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{p2}}{dz} = & i\gamma[|A_{p2}|^2 + 2(|A_{p1}|^2 + |A_s|^2 + |A_i|^2)]A_{p2} + \\ & 2i\gamma A_{p1}^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_{p2}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_s}{dz} = & i\gamma[|A_s|^2 + 2(|A_{p2}|^2 + |A_i|^2 + |A_i|^2)]A_s + \\ & 2i\gamma A_i^* A_{p1} A_{p2} \exp(-i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_s, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_i}{dz} = & i\gamma[|A_i|^2 + 2(|A_{p1}|^2 + |A_{p2}|^2 + |A_s|^2)]A_i + \\ & 2i\gamma A_s^* A_{p1} A_{p2} \exp(-i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_i, \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $\Delta\beta$ 为线性相位失配因子, γ 为非线性系数, α 为损耗。通过研究表明,要使光纤的增益增大,必须满

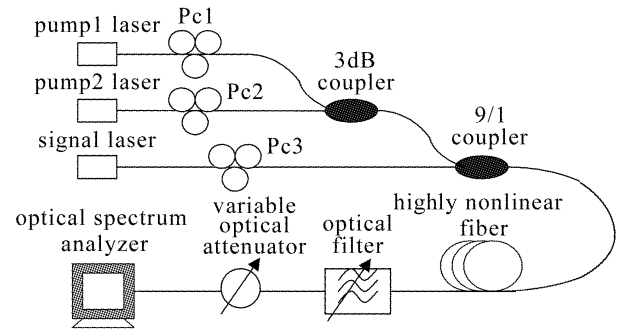


图 1 双抽运光参量放大实验示意图

Fig. 1 Schematic of dual-pump broadband fiber based optical parametric amplification (FOPA)

足总的相位匹配条件^[5],如果令

$$\delta = \Delta\beta + \gamma(p_{p1} + p_{p2}) = \Delta\beta + \gamma p_0, \quad (5)$$

$$p_0 = p_{p1} + p_{p2}, \quad (6)$$

γp_0 项为非线性相位失配因子,这时参量增益为^[5]

$$g = [(\gamma p_0 r)^2 - (\delta/2)^2]^{1/2}, \quad (7)$$

其中 $r = 2(p_{p1} p_{p2})^{1/2} / p_0$, (8)

经过进一步分析表明^[6]

$$\Delta\beta = \frac{\pi\lambda_0^3 c}{(\lambda_{p1}\lambda_{p2}\lambda_s)^2} \frac{dD}{d\lambda} \times [\lambda_0(\lambda_{p1} + \lambda_{p2}) - 2\lambda_{p1}\lambda_{p2}](\lambda_s - \lambda_{p1})(\lambda_s - \lambda_{p2}), \quad (9)$$

式中 $dD/d\lambda$ 为色散斜率($\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$), λ_0 为零色散波长, λ_{p1} 和 λ_{p2} 为两个抽运光波长, λ_s 为信号光波长, c 为光速。由于(7)式中必须有 $g > 0$, 得到线性相位失配因子的范围为

$$-\gamma p_0(2r + 1) < \Delta\beta < \gamma p_0(2r - 1), \quad (10)$$

令 $\Delta\beta = k(x - a)(x - b)$, (11)

其中

$$\begin{aligned} k &= \frac{\pi\lambda_0^3 c}{\lambda_{p1}\lambda_{p2}} \frac{dD}{d\lambda} [\lambda_0(\lambda_{p1} + \lambda_{p2}) - 2\lambda_{p1}\lambda_{p2}], \\ a &= \frac{1}{\lambda_{p1}}, \quad b = \frac{1}{\lambda_{p2}}, \quad x = \frac{1}{\lambda_s}, \\ c_1 &= -\gamma p_0(2r + 1), \quad c_2 = \gamma p_0(2r - 1), \\ c_3 &= \gamma p_0, \quad (12) \end{aligned}$$

通过(10), (11)式,可以解出 λ_s 的四个临界值(这里的临界值是指使得 $g = 0$ 时的 λ_s 的值)

$$\begin{aligned} \lambda_{s1} &= \frac{2k}{k(a+b) + \sqrt{k^2(a-b)^2 + 4kc_1}}, \\ \lambda_{s2} &= \frac{2k}{k(a+b) - \sqrt{k^2(a-b)^2 + 4kc_1}}, \\ \lambda_{s3} &= \frac{2k}{k(a+b) + \sqrt{k^2(a-b)^2 + 4kc_2}}, \\ \lambda_{s4} &= \frac{2k}{k(a+b) - \sqrt{k^2(a-b)^2 + 4kc_2}}, \quad (13) \end{aligned}$$

$\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}, \lambda_{s4}$ 都是可能的取值。

现在来研究峰值所对应的波长 $\lambda_{s\text{-peak}}$, 由(7)式可知, 要使 g 最大, 必须使得 δ^2 达到最小。因此, δ^2 对 λ_s 求导并令其等于零, 可以得到

$$\begin{aligned}\lambda_{s\text{-peak1}} &= \frac{2k}{k(a+b) + \sqrt{k^2(a-b)^2 - 4kc_3}}, \\ \lambda_{s\text{-peak2}} &= \frac{2k}{k(a+b) - \sqrt{k^2(a-b)^2 - 4kc_3}}, \\ \lambda_{s\text{-peak3}} &= \frac{2}{a+b},\end{aligned}\quad (14)$$

以上三个值都是 $\lambda_{s\text{-peak}}$ 所可能的取值。当已给定光纤参数, 通过(14)式, 可以很方便地计算出最大增益所需的信号光波长。

图2是参量增益系数随信号光波长变化曲线图, 其参数为: $\lambda_{p1} = 1562 \text{ nm}$, $\lambda_{p2} = 1542 \text{ nm}$, $\lambda_0 = 1552 \text{ nm}$, $\gamma = 20 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, $dD/d\lambda = 0.031 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$, $p_{p1} = p_{p2} = 200 \text{ mW}$ 。由图2可知, 如果能够满足 $\delta = 0$, 那么理论上 $g_{\text{max}} = 8 \text{ km}^{-1}$, 而实际 $g_{\text{max}} = 6.9727 \text{ km}^{-1}$, 可见, 在给定参数下不可能满足 $\delta = 0$ 。

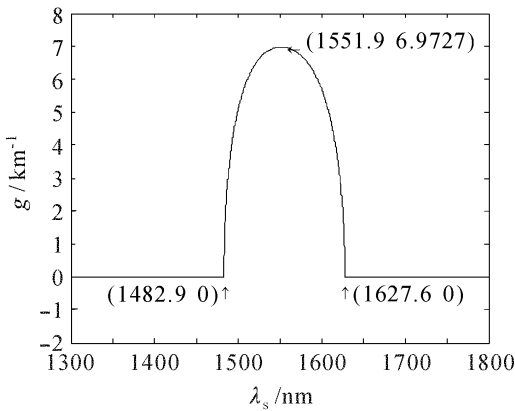


图2 参量增益曲线

Fig. 2 Curve of parametric gain

图3是当改变其中一个输入抽运光波长至 $\lambda_{p2} = 1550 \text{ nm}$ 时, 参量增益系数随信号光波长变化关系图, 其他参量同图2。由图3可知, 在 $\lambda_{s\text{-peak3}} = 1556 \text{ nm}$ 这一点出现凹陷, 峰值出现在 $\lambda_{s1} = 1545.1 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{s2} = 1567.0 \text{ nm}$, 在这两点达到相位匹配条件 $\delta = 0$, 而在中间那点没有达到相位匹配条件, 因而参量增益没有达到最大值。且由图3可知, 参量增益的带宽由原来的 $\Delta\lambda = 144.7 \text{ nm}$ 下降到 $\Delta\lambda = 33.9 \text{ nm}$ 。

在输入信号光波长已给定条件下讨论如何选取抽运波长使得参量增益最大。为了方便起见, 这里假定 λ_{p2}, λ_s 是定值, λ_{p1} 在变化, 由(9)式得

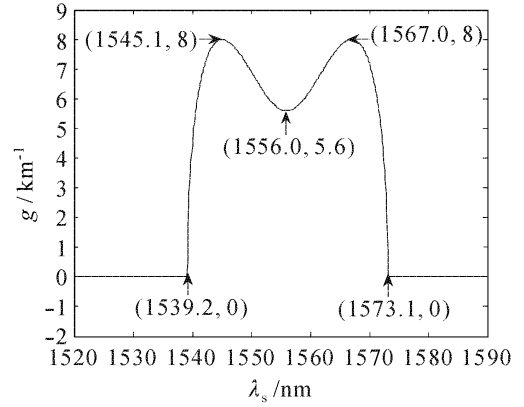


图3 当 $\lambda_{p2} = 1550 \text{ nm}$ 时的参量增益曲线

Fig. 3 Curve of parametric gain with $\lambda_{p2} = 1550 \text{ nm}$

$$\begin{aligned}\Delta\beta &= \frac{\pi\lambda_0^4 c}{\lambda_{p2}\lambda_s} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_s - \lambda_{p2}) \times \\ &\quad \left(\frac{1}{\lambda_{p1}} - \frac{2\lambda_{p2} - \lambda_0}{\lambda_{p2}\lambda_0} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{p1}} - \frac{1}{\lambda_s} \right),\end{aligned}\quad (15)$$

令 $\Delta\beta = l(x-m)(x-n)$, 其中

$$\begin{aligned}l &= \frac{\pi\lambda_0^4 c}{\lambda_{p2}\lambda_s} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_s - \lambda_{p2}), \\ x &= \frac{1}{\lambda_{p1}}, \quad m = \frac{2\lambda_{p2} - \lambda_0}{\lambda_{p2}\lambda_0}, \quad n = \frac{1}{\lambda_s}, \\ c_1 &= -\gamma p_0 (2r+1), \quad c_2 = \gamma p_0 (2r-1), \\ c_3 &= \gamma p_0,\end{aligned}\quad (16)$$

同理, 通过(10)式, 可以解出 λ_{p1} 的四个临界值(这里的临界值是指使得 $g = 0$ 时 λ_p 的值)

$$\begin{aligned}\lambda_{p1-1} &= \frac{2l}{l(m+n) + \sqrt{l^2(m-n)^2 + 4lc_1}}, \\ \lambda_{p1-2} &= \frac{2l}{l(m+n) - \sqrt{l^2(m-n)^2 + 4lc_1}}, \\ \lambda_{p1-3} &= \frac{2l}{l(m+n) + \sqrt{l^2(m-n)^2 + 4lc_2}}, \\ \lambda_{p1-4} &= \frac{2l}{l(m+n) - \sqrt{l^2(m-n)^2 + 4lc_2}},\end{aligned}\quad (17)$$

$\lambda_{p1-1}, \lambda_{p1-2}, \lambda_{p1-3}, \lambda_{p1-4}$ 都是可能的取值。

改变抽运光波长, 使得参量增益达到最大。 δ^2 对 λ_{p1} 求导并令其为零, 可以得到

$$\begin{aligned}\lambda_{p1\text{-peak1}} &= \frac{2l}{l(m+n) + \sqrt{l^2(m-n)^2 - 4lc_3}}, \\ \lambda_{p1\text{-peak2}} &= \frac{2l}{l(m+n) - \sqrt{l^2(m-n)^2 - 4lc_3}}, \\ \lambda_{p1\text{-peak3}} &= \frac{2}{m+n},\end{aligned}\quad (18)$$

以上三个值是使得 δ^2 达到最小时可能的 λ_{p1} 的取值。图4是在 $\lambda_{p2} = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1531 \text{ nm}$ 的情形下的参量增益曲线图, 其他参量同图2。

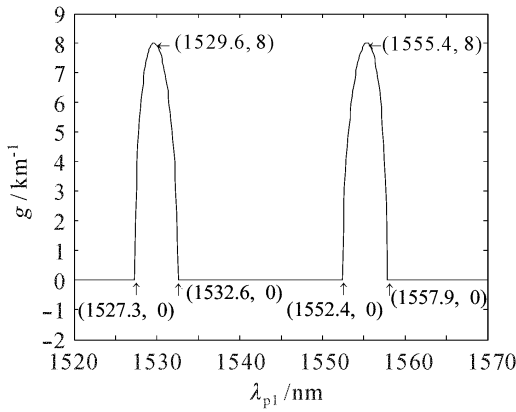


图 4 当 $\lambda_s = 1531$ nm, $\lambda_{p2} = 1550$ nm 时的参量增益曲线

Fig. 4 Curves of parametric gain with $\lambda_s = 1531$ nm, and $\lambda_{p2} = 1550$ nm

图 4 中出现四个临界值,刚好对应理论计算的四个零点值,两个峰值点所对应的波长分别为 $\lambda_{p1\text{-peak1}} = 1529.6$ nm, $\lambda_{p1\text{-peak2}} = 1555.4$ nm,在理论上还有个峰值对应的波长值 $\lambda_{p1\text{-peak3}} = 1542.4$ nm,但是在图中并没有出现峰值,这是因为参数选取的原因,当选取适当参数时,可以使得两个峰合为一个峰,这时 $\lambda_{p1\text{-peak3}} = 2/(m+n)$ 为所得的结果。由图可知,图中两个谱线的宽度并不宽, $\Delta\lambda_1 \approx \Delta\lambda_2 \approx 5.3$ nm。此时 $g_{\max} = 8$ km⁻¹,达到理论上的最大值,这是因为所取参数能够使得 $\delta^2 = 0$ 。

图 5 所示为参量增益随 λ_{p1} , λ_s 的变化关系图,其他参量同图 2。从图中可以明显看到 $g = g(\lambda_{p1})$ 图形中,波形如何分裂最后变成两个波形的变化趋势,因此,选择不同的 λ_s 就可以得到不同的 $g = g(\lambda_{p1})$ 图形。

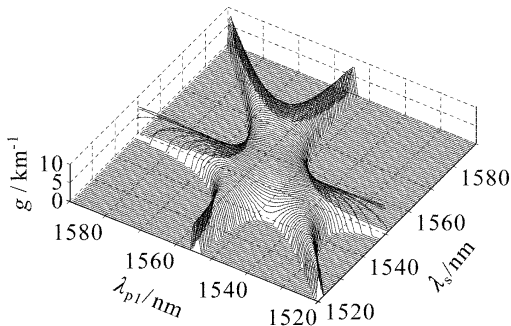


图 5 参量增益随 λ_{p1} , λ_s 同时变化的示意图

Fig. 5 Parametric gain as functions of pump1 and signal wavelengths

3 信号光的饱和增益

要使转换效率尽可能高,必须使 $\delta = 0$ 或 δ^2 尽

可能地小,为方便起见,选取 $\delta = 0$,即 $\Delta\beta = -\gamma(p_{p1} + p_{p2})$ 。选取参数为: $p_{p1} = 0.5$ W, $p_{p2} = 0.8$ W, $p_{s0} = 0.02$ W, $p_{i0} = 0$, $\gamma = 20$ km⁻¹ · W⁻¹, $\alpha = 0.51$ dB/km。图 6,图 7 是在不同的光纤长度 L 下,抽运光、信号光和闲频光的功率随传播距离的变化曲线,并且考虑了光纤损耗。由图可知,抽运光和信号光的功率随着光纤长度的增加,都有所损耗,并且功率大的抽运光,损耗也越大。另外, p_{p1} 光功率的谷值在不断下降, p_{p2} 光功率的谷值有所上升,但很缓慢,闲频光的转换效率很高,这对波长转换有利。图 7 是把光纤长度设置为 10000 m,其他条件不变,由图 7 可知,损耗对大功率的抽运光作用要明显,而对相对较小的抽运光和小信号光及其闲频光作用并不大,在 $L = 10000$ m 处,抽运光 1 的峰值功率衰减 $\Delta p_{p1} = 137.866$ mW,抽运光 2 的峰值功率衰减

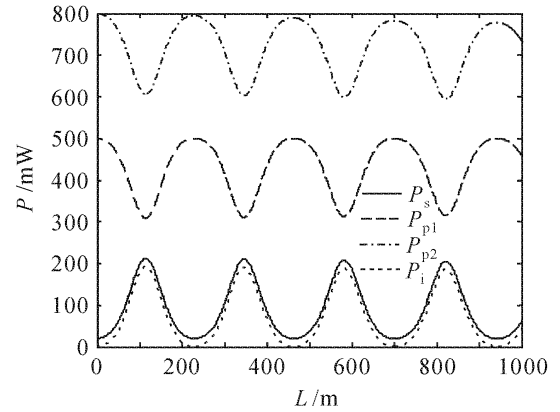


图 6 当 $L = 1000$ m 时,抽运光、信号光和闲频光的功率随传播距离的变化曲线

Fig. 6 Power of pump, signal and idler as a function of propagation distance with $L = 1000$ m

$p_{p1} = 0.5$ W, $p_{p2} = 0.8$ W, $p_{s0} = 0.02$ W, and $p_{i0} = 0$

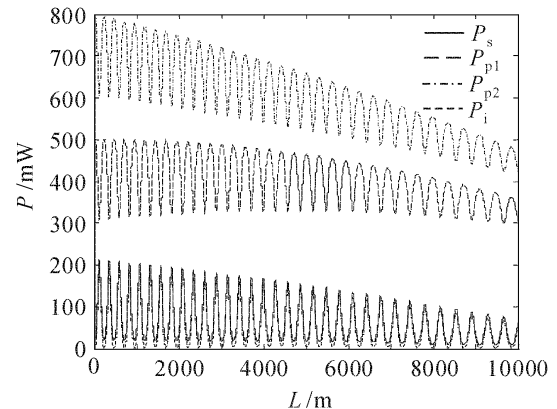


图 7 当 $L = 10000$ m 时,抽运光、信号光和闲频光的功率随传播距离的变化曲线

Fig. 7 Power of pump, signal and idler as a function of propagation distance with $L = 10000$ m

$p_{s0} = 0.02$ W, $p_{i0} = 0$, $p_{p1} = 0.5$ W, and $p_{p2} = 0.8$ W

$\Delta p_{p2} = 317.736 \text{ mW}$, 信号光的峰值功率衰减 $\Delta p_s = 141.807 \text{ mW}$ 。因此, 可以考虑用相对较小的强抽运光来减小损耗对其的影响。

由图 8, 图 9 可以定性分析影响信号光饱和增益^[7]的因素。忽略损耗对饱和增益的影响, 当抽运光功率一定时, 饱和增益随输入信号光功率的关系如图 8(a) 所示, 当抽运光功率在不同值时, 饱和增益是随输入信号光功率的增加而减小的。值得注意的是, 图 8(a) 所示的双抽运光功率是指每一个抽运光功率。

如图 8(a) 所示, 相同情况下, 非简并光参量放大的饱和增益要比简并的大, 这样, 可以在非简并的情形下, 用较小的抽运光功率得到较大的增益, 从而可以有效地降低受激布里渊散射的影响。图 8(b) 是在相同情况下, 把横坐标换为 $\log(1/p_s)$, 从图形可以看到, 饱和增益和 $\log(1/p_s)$ 成线性递增的趋势。

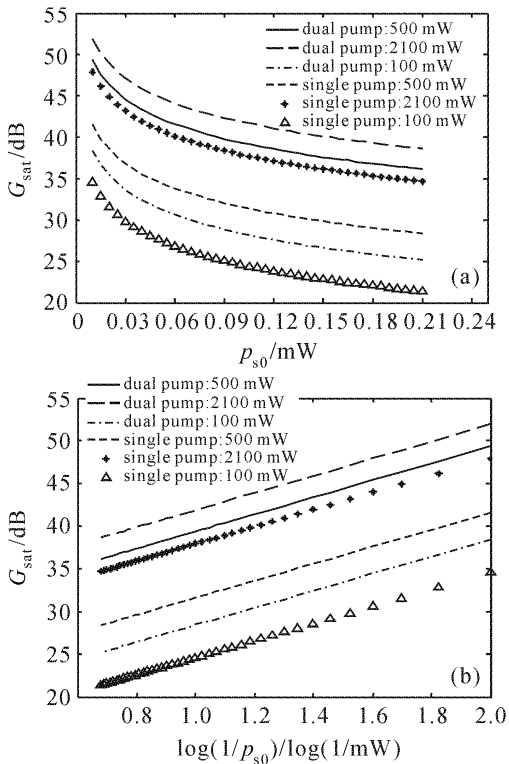


图 8 在不同抽运光功率情形时, 信号光饱和增益随信号光功率的变化图, (a), (b) 给出了不同横坐标下的模拟图

Fig. 8 Signal saturation gain as a function of signal power for different pump powers, (a) and (b) represent different forms of abscissa

图 9 是分别在信号光功率取不同值时, 增加抽运光功率, 饱和增益随抽运光功率的变化趋势图。对于非简并光参量放大过程, 横坐标是代表输入抽

运光功率的总和。从图 9(a) 可以看到, 在相同情况下, 非简并的光参量放大的饱和增益要比简并的大, 并且输入信号光功率越小, 饱和增益越大。从图形的趋势上看, 在抽运功率不大时, 饱和增益随功率成对数增长; 在大功率的情形, 饱和增益随抽运功率成线性关系; 当抽运功率达到一定值时, 饱和增益达到定值。当输入信号光功率相同时, 简并和非简并的饱和增益的最大值相同。例如当 $p_{s0} = 0.01 \text{ mW}$ 时, $G_{dp} = G_{sp} = 56.4659 \text{ mW}$ (下标 dp, sp 分别代表双抽运和单抽运), 而达到最大值时所需要的抽运光功率分别为 $p_{p0_{dp}} = 3400 \text{ mW}$, $p_{p0_{sp}} = 4900 \text{ mW}$ 。

由图 9 可知, 当输入抽运功率不大时, 简并和非简并的光参量放大的饱和增益相差不是很大; 但当输入功率达到一定值时, 非简并的光参量放大就显示出高增益的特性。因而可以利用这一点来得到高增益的信号光。图 9(b) 是用对数坐标画的图。前半段呈现很好的线性, 后半段有一定的弯曲, 与图 9(a) 相对应。

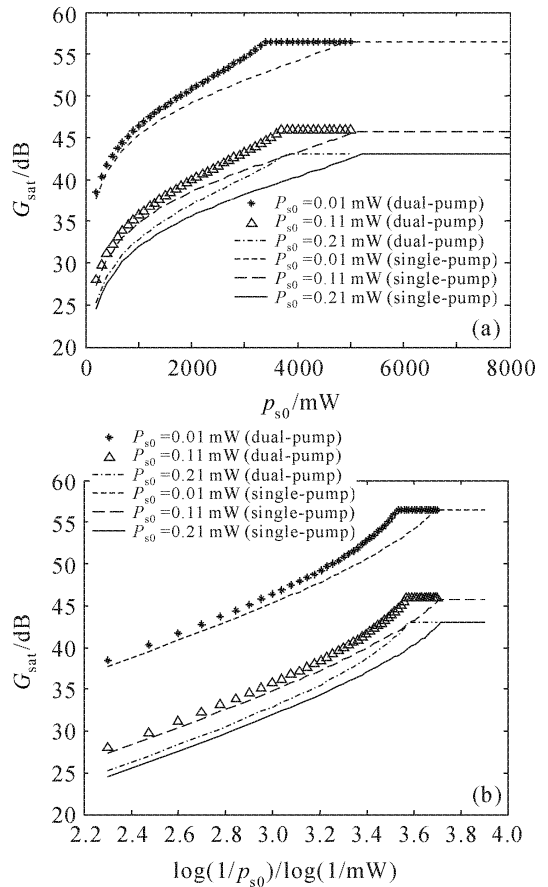


图 9 在不同信号光功率情形时, 信号光饱和增益随抽运光功率的变化图, (a), (b) 给出了不同横坐标下的模拟图

Fig. 9 Signal saturation gain as a function of pump power for different signal powers, (a) and (b) represent different forms of abscissa

4 结 论

根据非简并四波混频的相位匹配条件, 得出了获得最大增益的信号光波长的表达式。还通过计算机模拟, 定性分析了饱和增益随抽运光和信号光功率的关系, 并得出初步结论: 1) 参量放大器的增益与相位匹配条件有关, 要得到高的参量增益, 必须相位匹配。2) 相同条件下, 非简并光参量放大比简并时的增益要大。3) 要使饱和增益大, 应尽可能增大抽运光功率, 但过大抽运光功率又会产生受激布里渊散射。因此, 要综合考虑以上因素来选取相关参数。

参 考 文 献

- 1 S.-K. Choi, R.-D. Li, C. Kim *et al.*. Traveling-wave optical parametric amplifier: Investigation of its phase-sensitive and phase-insensitive gain response [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7):1564~1575
 - 2 M. Onishi, T. Okuno, T. Kashiwida *et al.*. Highly nonlinear dispersion-shifted fibers and their application to broadband wavelength converter [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1998, **4**(2): 204~214
 - 3 D. L. Philen, D. W. Peckham, I. Brener. Measurement of the nonlinear index of refraction, N_2 , for various fiber types [C]. *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, 2000, **3**:184~186
 - 4 F. S. Yang, M. E. Marhic, L. G. Kazovsky. CW fibre optical parametric amplifier with net gain and wavelength conversion efficiency >1 [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(25):2336~2338
 - 5 M. E. Marhic, Y. Park, F. S. Yang *et al.*. Broadband fiber-optical parametric amplifiers and wavelength converters with low-ripple Chebyshev gain spectra [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1354~1356
 - 6 K. Inoue. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero dispersion wavelength region [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11):1553~1561
 - 7 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Li Mingzhong *et al.*. Chirped-pulse spectrum shaping using the over-saturating course in optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1527~1531
- 邓青华, 彭翰生, 李明中等. 光参量啾啾脉冲过饱和放大实现超短脉冲的频谱整形[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1527~1531