

文章编号: 0253-2239(2004)08-1085-6

光纤参变放大器光纤长度的优化设计

曹 辉^{1,2} 孙军强¹ 张新亮¹ 黄德修¹

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074
² 佛山科学技术学院理学院物理学系, 佛山 528000)

摘要: 随着高输出功率掺铒光纤放大器和高非线性光纤的出现和使用, 光纤参变放大器(OPAs)中出现了越来越多的增益饱和现象, 这是光放大器中应该尽量避免的。对此, 提出了依据光纤参变放大器的光纤非线性系数、抽运光功率、信号输入功率等参量对光纤长度进行优化设计的解决思路。明确提出最佳光纤长度的概念, 即在其他参量一定的情况下使信号增益或信号输出功率达到最大所需的最小光纤长度, 而且最佳光纤长度有利于提高光纤参变放大的增益带宽和波长转换带宽。通过数值积分求解描述光纤参变放大过程的非线性耦合方程, 并运用控制变量法深入研究了最佳光纤长度与光纤非线性系数、抽运光功率、信号输入功率的关系。最后用最小二乘法进行数据拟合确定系数, 得到简洁、实用的最佳光纤长度解析表达式。与已有实验结果比较表明, 该解析式可很好地用来计算和优化光纤参变放大的光纤长度。

关键词: 光纤通信技术; 光纤参变放大; 光纤长度; 增益饱和

中图分类号: TN913.7 文献标识码: A

Optimized Design of the Fiber Length for Fiber Optical Parametric Amplifier

Cao Hui^{1,2} Sun Junqiang¹ Zhang Xinliang¹ Huang Dexiu¹

(¹ Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science
& Technology, Wuhan 430074
² Department of Physics, Foshan University, Foshan 528000)

(Received 28 May 2003; revised 28 December 2003)

Abstract: With the increasing availability of high output power erbium-doped fiber amplifier and the development of highly nonlinear fibers, more gain saturation phenomena are observed in fiber optical parametric amplifiers (OPAs), which are expected to be avoided. A practicable method is proposed to avoid the gain saturation phenomenon, that is optimizing fiber length according to other parameters of fiber OPA, such as nonlinear coefficient, input pump power and input signal power. The concept of optimum fiber length is introduced, namely the minimum fiber length needed for the maximum signal gain or signal output power with other parameters fixed. The optimum fiber length is of great benefit to boost the gain bandwidth and the conversion bandwidth. By solving the nonlinear coupled equations that govern the fiber parametric amplifying process with numerical integration as well as adopting controlled variable method, the optimum fiber length as a function of nonlinear coefficient, input pump power and input signal power is profoundly studied. Finally, coefficients are figured out with least square method, and a pithy and useful analytical expression for the optimum fiber length is presented. Compared with existing experimental result, this analytical expression could be soundly used to optimize fiber length for fiber OPAs.

Key words: optical fiber communication technology; fiber optical parametric amplifier; fiber length; gain saturation

1 引 言

晶体中的光参变放大现象人们已进行了深入研究^[1~3],而基于光纤非线性效应的光纤参变放大(OPA)以其高增益(小信号近似时,与抽运光功率成指数关系)、宽带宽(可以在光通信范围内全波段工作)、具有相敏特性(可实现 0 dB 自发辐射噪声放大)、产生闲频带(在放大信号的同时可进行波长转换)等显著优点在光通信领域也引起了人们的关注^[4~6]。随着研究的深入,光纤参变放大技术得到迅猛发展。利用光纤参变放大,可以实现光通信中绝大部分全光操作,如光信号放大、波长转换、全光抽样、光开关、光脉冲生成、光解复用、脉冲压缩、3R 再生、全光缓存等^[7~10]。可见,光纤参变放大在密集波分复用系统、全光网等领域将有非常广泛而重要的运用。

人们对光纤参变放大的理论研究,通常采用小信号近似,得到信号增益与光纤长度、抽运光功率、非线性系数三者的乘积成指数关系的解析表达式^[11]。在三者乘积较小的前提下,它可很好地解释许多有关的实验现象。但随着高非线性光纤(HNLF)、高功率半导体激光器和高输出功率(超过 1 W)掺铒光纤放大器的出现及应用,光纤参变放大中容易出现增益饱和现象。在增益饱和区,光纤参变放大的增益将随抽运光功率或信号功率的增加而减小,这是光放大器应该尽量避免的现象。Jonas Hansryd 等^[4]早已观察到此现象,Kyo Inoue 和 Takaai Mukai^[12]则研究了饱和增益的波长相关性,但都没有研究解决的方法。本文提出了依据光纤参变放大器的光纤非线性系数 γ 、抽运光功率 P_{p0} 、信号输入功率 P_{s0} 等参量对光纤长度进行优化设计的解决思路。计算表明光纤参变放大的光纤长度并非越长越好,据此明确提出了最佳光纤长度的概念,即在其他参量一定的情况下使信号增益或信号输出功

率达到最大所需的最小光纤长度。深入研究了最佳光纤长度与光纤非线性系数、抽运光功率、信号输入功率的关系,最后用最小二乘法进行数据拟合确定系数,得到简洁、实用的最佳光纤长度的解析表达式,为光纤参变放大设计中光纤长度的选取提供了重要依据。

2 最佳光纤长度的定义

目前广泛研究和采用的光纤参变放大结构如图 1 所示,以高抽运光功率和低信号功率入纤,且在 $z=0$ 处可认为闲频光功率为零,但在很小的一段传播距离内就产生闲频光,其角频率满足 $\omega_s + \omega_i = 2\omega_p$ (文中下标 p、s、i 分别代表抽运光、信号光和闲频光)。下面对此过程进行研究。

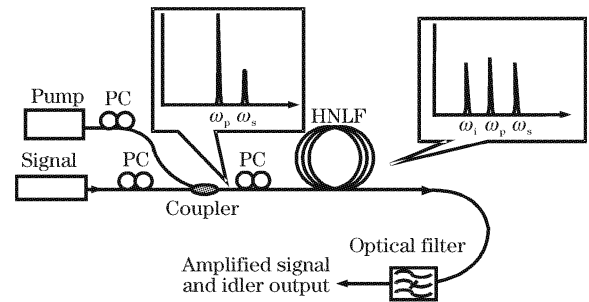


Fig. 1 General scheme of fiber-based optical parametric amplifier. PC: polarization controller, HNLF: highly nonlinear fiber

假定沿 x 方向偏振的三个光波同沿 z 方向传播,不考虑光纤损耗,由非线性介质中光的传播方程^[5]可导出用功率和相位表示的耦合方程^[11]:

$$\begin{cases} \frac{dP_p}{dz} = -4\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin \theta, & (1) \\ \frac{dP_s}{dz} = 2\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin \theta, & (2) \\ \frac{dP_i}{dz} = 2\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin \theta, & (3) \end{cases}$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \Delta\beta + \gamma(2P_p - P_s - P_i) + \gamma \left[\left(\frac{P_p^2 P_i}{P_s} \right)^{1/2} + \left(\frac{P_p^2 P_s}{P_i} \right)^{1/2} - 4(P_s P_i)^{1/2} \right] \cos \theta, \quad (4)$$

其中 P_p 、 P_s 、 P_i 分别表示三个光波的功率; $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}$ 为光纤的非线性系数,这里忽略了三者频率的微小差异而认为它们的 γ 相等; θ 表示三个光波的相对相位差,

$$\theta(z, t) = \Delta\beta z + 2\varphi_p(z) - \varphi_s(z) - \varphi_i(z) + 2\omega_p t - \omega_s t - \omega_i t, \quad (5)$$

由(1)式~(4)式可知,当 $\theta = \pi/2$ 时,能量由抽运光流向信号光和闲频光,对应于参变放大;当 $\theta = -\pi/2$ 时,能量由信号光和闲频光流向抽运光,对应于参变衰减。若在输入端满足了 $\theta = \pi/2$,要得到持续的参变放大,还需要:1) θ 不随时间变化,由(5)式可知需要满足所谓能量守恒条件: $\omega_s + \omega_i = 2\omega_p$,2) θ 不随 z 变

化或随 z 缓慢变化,由 $\theta = \pi/2$ 和(4)式可知,需要

$$\Delta\beta = -\gamma(2P_p - P_s - P_i), \quad (6)$$

将 $\beta(\omega)$ 在零色散频率附件展开到四阶,得到 $\Delta\beta$ 与波长的关系近似为

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p) \approx -\frac{2\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)(\lambda_p - \lambda_s)^2, \quad (7)$$

可见(6)式能通过选择适当波长和功率的抽运光和信号光在参变放大过程开始时得到满足。Inoue 和 Mukai^[13] 已经指出对于图 1 这种情形,闲频光的初始相位为

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} + 2\varphi_p - \varphi_s - \Delta\beta z,$$

考虑到(6)式初始时得到满足,可知在输入端 $\theta_{z=0} = \pi/2$,为参变放大,但随着参变放大过程的进行,(6)式越来越偏离满足, θ 偏离 $\pi/2$,在 θ 由 $\pi/2$ 到 $-\pi/2$ 变化过程中,能量在抽运光以及信号光和闲频光间振荡。

取初值 $P_{p0} = 1000$ mW, $P_{s0} = 1$ mW, $P_{i0} = 10^{-12}$ mW(充分小但不为零以进行数值积分), $\gamma = 17$ W⁻¹km⁻¹, $\theta_{z=0} = \pi/2$, 光纤长 1500 m, 利用(6)式,数值求解微分方程组(1)式~(4)式得到抽运光功率 P_p 和 P_{sout} 信号输出功率随光纤长度的变化情况如图 2。可见,信号输出功率 P_{sout} 随光纤长度振荡且存在多个光纤长度使之达到最大。这说明光纤参变放大中光纤并非越长越好,而应该根据光纤参变放大的其他参量对光纤长度进行优化设计。为此提出最佳光纤长度的概念,如图 2 所示,所谓最佳光纤长度 L_{opt} 就是指对给定的各光纤参量,使信号输出功率或信号增益达到最大所需的最小光纤长度。其物理意义是:在给定的非线性系数、抽运光功率、初始信

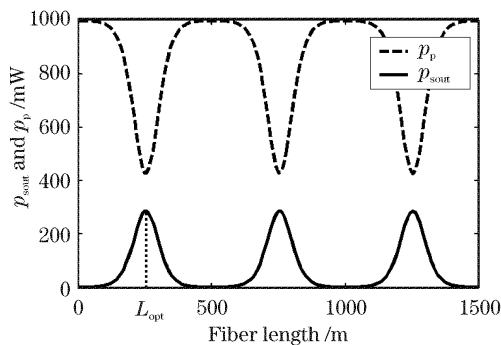


Fig. 2 Pump P_p and signal P_{sout} output power evolution as a function of fiber length for a fiber OPA. $P_{p0} = 1000$ mW, $P_{s0} = 1$ mW, $P_{i0} = 10^{-12}$ mW, $\gamma = 17$ W⁻¹km⁻¹, $\theta_{z=0} = \pi/2$

号输入功率的条件下,光纤参变放大工作在最佳光纤长度,实现以最短的光纤获得最大的信号增益,且不出增益饱和现象。而且,零色散波长沿纵向的变化即群速色散的纵向变化、光纤中的双折射、线性相位失配 $\Delta\beta L$ 不仅降低信号增益,而且限制增益带宽^[14],幸运的是,它们的影响都随光纤长度的减小而减小,因此,最佳光纤长度的另一个重要意义在于有利于提高光纤参变放大的增益带宽和波长转换带宽,这正好能满足光通信中光放大器的高增益、宽带宽要求。

借助于图 3 我们可以对最佳光纤长度 L_{opt} 有更直观的认识。图 3(a)为 L_{opt} 随抽运光功率 P_{p0} 增加而减小的变化曲线;图 3(b)中实线和点线分别为光纤取固定长度(200 m和300 m)时增益随抽运光功率 P_{p0} 的变化曲线,显然有增益饱和现象出现;图 3(b)中虚线为理想光纤参变放大增益随抽运光功率 P_{p0} 的变化情况,该光纤参变放大要求光纤长度和抽运光功率均可调,且当抽运光功率变化时,光纤长度则调节至对应的 L_{opt} [即光纤长度按图 3(a)随抽运光功率 P_{p0} 变化],如图 3(b)中虚线所示,其增益将始终随抽运光功率 P_{p0} 增加而增加,而不出增益饱和现象。理想光纤参变放大虽难以实现,但其光纤长度随抽运光功率 P_{p0} 增加而减小、增益曲线(虚线)恰好为实线和点线的包络,这些显著特点直观地表明最佳光纤长度是在提高信号增益这个意义上的最佳,即若光纤长度小于最佳光纤长度则光纤参变放大的信号增益没有达到最大,反之则将出现增益饱和现象。

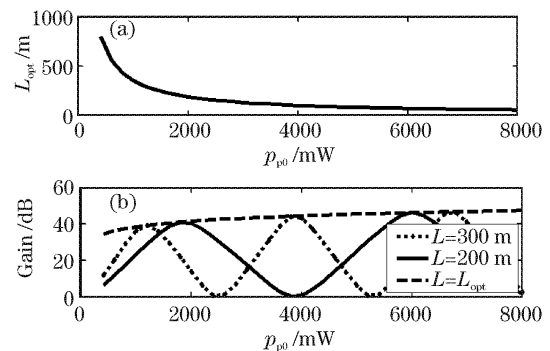


Fig. 3 (a) Optimum fiber length as a function of pump power, (b) signal gain (the solid line and dotted line denote fiber OPA with fixed fiber length 200 m and 300 m respectively, whereas the dashed line denotes a fiber OPA with fiber length varied as (a) as a function of pump power, $\gamma = 17$ W⁻¹km⁻¹, $P_{s0} = 40$ μ W

3 L_{opt} 与 P_{p0} 、 P_{s0} 、 γ 的函数关系

由耦合方程知,由于 θ 初值为 $\pi/2$, $P_{i0} \approx 0$ mW, 最佳光纤长度 L_{opt} 只可能与 P_{p0} 、 P_{s0} 和 γ 有关。为了研究它们之间的关系,我们采用控制变量法:首先保持 P_{p0} 、 P_{s0} 一定,研究 L_{opt} 与 γ 的关系,将 γ 取一系列值,在足够大的光纤长度范围内对耦合方程进行数值积分,就每一个给定的 γ ,求得相应的 L_{opt} ,得到 L_{opt} 随 γ^{-1} 变化的情况如图 4 所示,在误差范围内可以得出 L_{opt} 与 γ 成反比,另一方面,也可从耦合方程右边都与 γ 成正比,推出 L_{opt} 与 γ 成反比,写成数学表达式:

$$L_{opt} = f(P_{p0}, P_{s0})/\gamma, \quad (8)$$

然后用同样的方法研究 L_{opt} 与 P_{p0} 的关系,得到对应 P_{s0} 分别等于 $5 \mu\text{W}$, $45 \mu\text{W}$, $85 \mu\text{W}$ 时 L_{opt} 随 P_{p0} 变化的三条曲线如图 5(a) 所示, L_{opt} 随 P_{p0} 的增大而

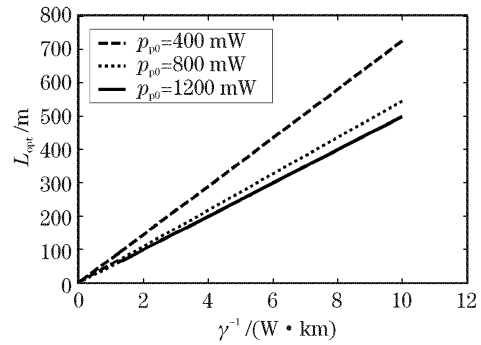


Fig. 4 Calculated optimum fiber length versus the reciprocal of nonlinear coefficient using three different pump powers, $P_{s0} = 40 \mu\text{W}$

减小,估计 L_{opt} 也与 P_{p0} 成反比,绘出 $L_{opt} - P_{p0}^{-1}$ 图,如图 5(b) 为直线,说明 L_{opt} 随 P_{p0}^{-1} 线性变化,注意到三条直线斜率和截距因 P_{s0} 而异,不失一般性,记为

$$f(P_{p0}, P_{s0}) = \alpha(P_{s0})P_{p0}^{-1} + \beta(P_{s0}), \quad (9)$$

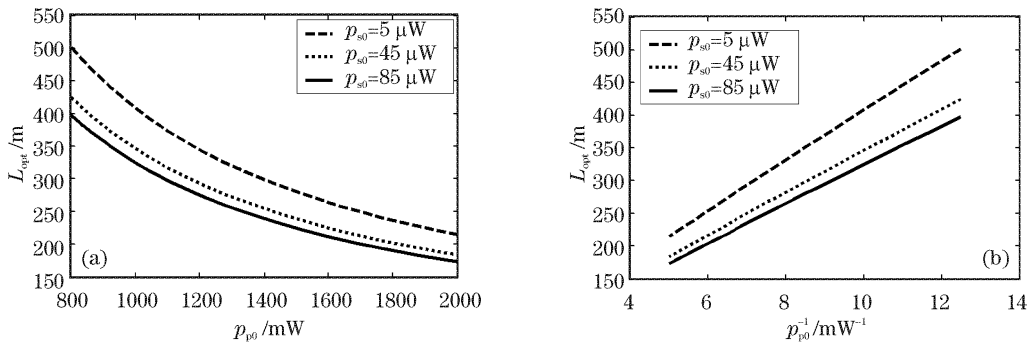


Fig. 5 Optimum fiber length evolution as a function of (a) pump power (b) the reciprocal of pump power for a fiber OPA with three different signal input powers, $\gamma = 17 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$

最后研究 L_{opt} 与 P_{s0} 的关系以确定 $\alpha(P_{s0})$ 和 $\beta(P_{s0})$ 的函数形式,绘出对应 P_{p0} 等于 0.8 W , 1.4 W , 2.0 W 时 L_{opt} 随 P_{s0} 变化的三条曲线如图 6(a) 所示,得到与小信号近似截然不同的结果,即 L_{opt} 绝非不随 P_{s0} 变化,而是随 P_{s0} 的增大而减小,依然估计 L_{opt} 与 P_{s0} 成反比,绘出 $L_{opt} - P_{s0}^{-1}$ 曲线,如图 6(b) 所示,非常

接近对数关系,图 6(c) 给出 $L_{opt} - \lg(P_{s0}^{-1})$ 曲线,可近似认为 L_{opt} 随 $\lg(P_{s0}^{-1})$ 或者 $\lg(P_{s0})$ 线性变化,故 $\alpha(P_{s0})$ 和 $\beta(P_{s0})$ 中最高只含 $\lg(P_{s0})$ 的一次项,不妨令

$$\alpha(P_{s0}) = C_1 \lg(P_{s0}) + C_2, \quad (10)$$

$$\beta(P_{s0}) = C_3 \lg(P_{s0}) + C_4, \quad (11)$$

综合(8)式~(11)式,经简单的代数推演可得 L_{opt} 关

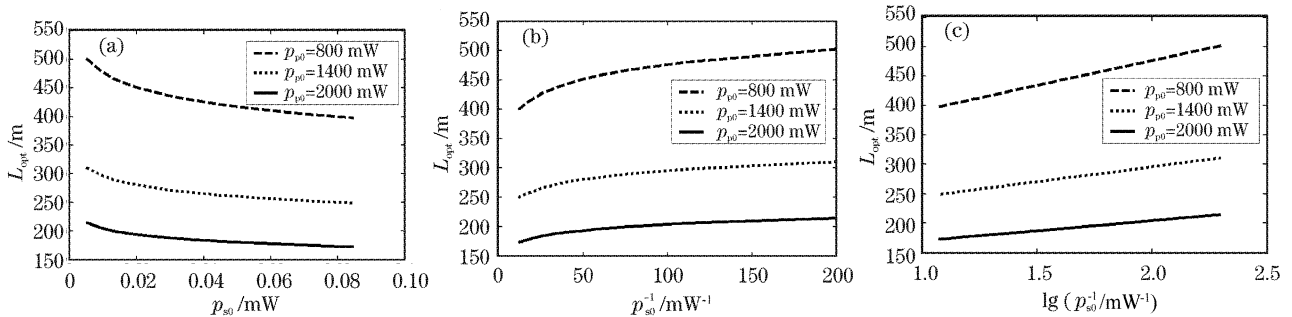


Fig. 6 Optimum fiber length evolution as a function of (a) signal input power (b) the reciprocal of signal input power, (c) the logarithm of the reciprocal of signal input power for a fiber OPA with three different pump powers, $\gamma = 17 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$

于 P_{p0} 、 P_{s0} 、 γ 的函数关系式

$$L_{\text{opt}} = \frac{1}{\gamma} \left(a_0 + \frac{a_1}{P_{p0}} + a_2 \lg P_{s0} + \frac{a_3 \lg P_{s0}}{P_{p0}} \right), \quad (12)$$

其中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为待定系数。可以断言,不可能对待定系数的四项在实数范围内因式分解得出更简洁的函数形式,图 5(b)或图 6(c)中各直线斜率不同即为佐证。

4 L_{opt} 的解析表达式

为了确定 L_{opt} 与 P_{p0} 、 P_{s0} 、 γ 的数量关系,需要确

$$L_{\text{opt}} = \frac{1}{\gamma} \left(396.87 + \frac{3.8860 \times 10^6}{P_{p0}} + 0.3527 \times \lg P_{s0} - \frac{1.1522 \times 10^6 \times \lg P_{s0}}{P_{p0}} \right), \quad (13)$$

其中 γ 、 P_{p0} 、 P_{s0} 的单位分别取 $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、 mW 、 mW 。

从图 7 中 L_{opt} 随 P_{p0} 、 P_{s0} 变化的情况看来,在设计光纤参变放大时根据具体的 P_{p0} 、 P_{s0} 计算相应的 L_{opt} 显得非常必要。用(13)式计算得到的 L_{opt} 与通过数值积分求得的 L_{opt} 相比,最大相对误差不超过 0.75%。经计算比较,其精度甚至优于直接用 P_{p0} 、 P_{s0} 为变量按 15 项多项式拟合的结果,这进一步说明(13)式正确描述了 L_{opt} 与 P_{p0} 、 P_{s0} 和 γ 之间的函数关系。

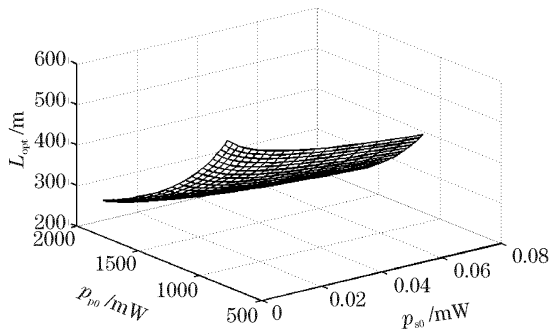


Fig. 7 Mesh plot of calculated optimum fiber length versus pump power and signal input power, $\gamma=17 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$

5 与已有实验结果比较

将 Hansryd 的实验参量^[4]: $\gamma=11.4 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $P_{p0}=1148 \text{ mW}$ (输入的 31.0 dB 抽运光功率经 0.4 dB 插入损耗后的值), $P_{s0}=0.0112 \text{ mW}$ (-19.5 dBm)代入(13)式计算得到 $L_{\text{opt}}=503.3 \text{ m}$ 。Hansryd 在实验中得到最大信号增益的光纤长度为 500 m^[4],两者比较,计算结果与实验结果吻合得较好,相对误差为 0.66%,在预计的误差范围之内,可见(13)式可很好的用来计算光纤参变放大 P_{p0} 、 P_{s0} 在上述范围取值

定(12)式中的四个系数,这里采用最小二乘法数据拟合方法。光纤参变放大各参量取值如下: $P_{i0}=10^{-12} \text{ mW}$ (充分小但不为零以进行数值积分), $\gamma=17 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $\theta_{z=0}=\pi/2$, 而 P_{p0} 、 P_{s0} 分别在 800~1900 mW 和 5~80 μW 之间取值,利用(6)式,数值积分求解(1)式~(4)式,得到与不同 P_{p0} 、 P_{s0} 对应的 L_{opt} 序列。依据(12)式,将 $1/P_{p0}$ 、 $\lg(P_{s0})$ 、 $\lg(P_{s0})/P_{p0}$ 视为三个独立变量,采用多变量最小二乘法即可求得四个系数,进而得到最佳光纤长度 L_{opt} 的解析表达式

时的 L_{opt} 。

结束语 针对大功率抽运的光纤参变放大易出现增益饱和的现象,提出对光纤长度进行优化设计;在信号增益达到最大的意义上定义了最佳光纤长度,忽略光纤损耗,并以抽运光和信号光波长的选择满足(6)式实现最初的相位匹配为前提,分析了最佳光纤长度与光纤非线性系数、抽运光功率、信号输入功率的关系,并得到最佳光纤长度的解析式。因最佳光纤长度是使光纤参变放大增益达到最大且避免增益饱和的最小光纤长度,应尽量使光纤参变放大在此光纤长度工作,以满足光通信对光放大器高增益、宽带宽的要求。而最佳光纤长度解析表达式的得到为光纤参变放大中光纤长度的选取提供了重要依据。

参 考 文 献

- 1 Su Hong, Zhang Weijun, Wang Shixing. Experimental scheme of nonideal QND measurement for intensity difference fluctuations. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):857~860 (in Chinese)
- 2 Peng Jiahui, Li Ruxin, Jin Shiqi *et al.*. Optical parametric chirped pulse amplifier with biaxial crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(9):1156~1159 (in Chinese)
- 3 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three wave mixing optical parametric amplifiers. *Chin. J. Laseres* (中国激光), 2002, **29**(8): 680~686 (in Chinese)
- 4 Hansryd J, Andrekson P A. Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):194~196
- 5 Marhic M E, Kagi N, Chiang T K *et al.*. Broadband fiber optical parametric amplifiers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 573~575

6 Islam M N, Boyraz O. Fiber parametric amplifiers for wavelength band conversion. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronic*, 2002, **8**(3): 527~537

7 Hansryd J, Andrekson P A. OTDM demultiplexer with 40-dB gain based on a fiber optical parametric amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7):732~734

8 Hansryd J, Andrekson P A. Wavelength tunable 40 GHz pulse source based on fiber optical parametric amplifier. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9):584~585

9 Li J, Hansryd J, Hedekvist P O *et al.*. 300 Gbit/s eye-diagram measurement by optical sampling using fiberbased parametric amplification. *Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibit*, 2001, **4**:PD31-1~PD31-3

10 Agarwal A, Wang L J, Suet Y K *et al.*. All-optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber. *OFC/2001*, **4**: ThH5-1~ThH5-3

11 Hansryd J, Andrekson P A. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 2002, **8**(3): 506~518

12 Inoue K, Mukai T. Signal wavelength dependence of gain saturation in a fiber optical parametric amplifier. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(1): 10~12

13 Inoue K, Mukai T. Signal output characteristics in a fiber optical parametric amplifier in high-gain-saturation region. Lasers and Electro-Optics Society, 2000 *Annual Meeting. LEOS 2000. 13th Annual Meeting*. 2000, **2**: 665~666

14 Aso O, Shin-Ichi Ara, Ya Gi *et al.*. Broadband four-wave mixing generation in short optical fibres. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 709~711

 (上接封四)

3.6 计量单位 严格执行国家标准 GB3100~3102-93 规定。在光学论文中常见的如 Å, 托(Torr), 高斯(G 或 GS)等已废止, 必须折算成现行标准。1Å=0.1 nm, 1 托=1 mmHg=133.3 Pa, 1G(GS)=10⁻⁴ T, wt%→质量分数 w , vol%→体积分数, mol%→摩尔分数 x 或 y , at%→原子数分数 x 或 y 。数字: 处理后的数字的精度或有效数字位数不可能超过原始数据的精度或有效数字位数。

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物, 以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以 GB/T 7714-1987 顺序编码制列出, 每条内容应包括: 作者(或译者, 论文集编者, 多于 3 人者用等或 et al.), 文题, 期刊名(或书名, 会议名), 出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间), 起止页码。专利需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。中文参考文献应分别用中英文写出所有项目, 并都须加上参考文献类型的标识:

参考文献类型	期刊	专著	论文集	学位论文	标准	专利	报告	报纸
文献类型标识	J	M	C	D	S	P	R	B

具体格式实例如下:

- (1) 期刊: 张 娟, 刘立人, 周 煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报. Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12):1424~1428 (in Chinese)
- (2) 专著: 金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社. Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)
- (3) 译著: 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[T]. 杨荫孙译. 北京: 科学出版社. Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[T]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978, 182~190 (in Chinese)
- (4) 学位论文: 张 景. 激光二极管微振动传感器及其在肌肉震颤测量中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学. Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000, 21~30 (in Chinese)
- (5) 技术标准: 国家标准化技术委员会. 量和单位 GB3100~3102-93[S]. 北京: 中国标准出版社. National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press, 1994

为了避免漏引, 并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》等中国光学类期刊的国际、国内影响, 希望增引您自己和同行近二年在《光学学报》、《中国激光》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 基金项目: 所投文章项目受到资助的, 应标明资助名称及批准号。

作者简历: 出生年月, 出生地, 职务/职称, 熟悉的学科和课题——不超过 3 个。

此两项置于文章首页页脚。

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化, 加快稿件处理速度, 从 2003 年 5 月 1 日起一律采用 E-mail 投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(100~300 字); 标明“稿件内容不涉及国家机密”、“此稿无一稿两投”、“作者排名不再随意更改”的证明件(盖章), 挂号寄往: 201800 上海 800-211 信箱光学学报编辑部(请不要交寄个人, 以免延误稿件的受理时间)。稿件录用后, 须提供文章修改定稿后的电子版(包括图)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和《万方数据数字化期刊网》等, 不再另行通知作者, 对版权有特殊要求者, 请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用; 编辑部自收稿日起 4 个月内将初审意见函告作者, 逾期, 作者可另行处理原稿, 但需告知编辑部。

5 版权转让 在审稿通过后, 作者须转让著作权人作品版权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部, 并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函。

6 录用与否 录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神, 支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来来稿量猛增, 为了缩短发表周期, 请作者精炼文章内容, 更不要加附录, 否则, 超过 4 页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登, 本刊享有版权, 并向作者酌付稿酬, 寄送该期刊一册和抽印本 10 份。

7 投稿及回复时, 请告知作者的有效联系方式 除“姓名、通讯地址、邮政编码”外; E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机等是必不可少的。并请用 E-mail 回复修改意见和修改稿(修改部分请划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。

8 请推荐 3~5 位同行专家(包括海外华人研究人员)作候选审稿人 (给出他们从事研究的学科和课题, 通讯地址和 E-mail)。