

文章编号: 0258-7025(2004)03-0310-03

光子晶体光纤参量放大的理论模拟

倪屹, 王青, 张磊, 刘小明, 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 光子晶体光纤具有高非线性系数和非常灵活的色散特性,通过调节光子晶体光纤的结构参量,可在具有高非线性系数的同时对光子晶体光纤的零色散波长(λ_0)进行调节。利用光子晶体光纤的这些特性可实现在所需波长上的高效率的参量放大。本文采用厄密-高斯函数展开的方法,计算了六角形光子晶体光纤(HF)的零色散波长,发现当气孔间距在 $1.1 \mu\text{m}$ 和 $2.6 \mu\text{m}$ 之间时,光子晶体光纤的零色散波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近,并给出了零色散波长时气孔间距和气孔大小的关系曲线。对光子晶体光纤中的参量放大(OPA)进行了理论模拟,计算表明在 20 m 光子晶体光纤中,当峰值功率为 10 W 时,参量放大的增益可达 60 dB,或可获得 300 nm 增益带宽。

关键词 光电子学;光子晶体光纤;色散;色散斜率;参量放大

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

Simulation of Optical Parametric Amplification Using Holey Fiber

NI Yi, WANG Qing, ZHANG Lei, LIU Xiao-ming, PENG Jiang-de

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Holey fiber (HF) can have high nonlinearity and very flexible dispersion. The zero-dispersion wavelength (λ_0) of HF with high nonlinearity can be adjusted by changing the structure parameters of PCF. This can be used to generate high efficient optical parametric amplification (OPA) at desired wavelength in HF. Hermite-Gaussian functions have been used to calculate the zero-dispersion wavelength of hexagon HF, calculations show that when pitch is between $1.1 \mu\text{m}$ and $2.6 \mu\text{m}$, the λ_0 of HF is around $1.55 \mu\text{m}$, and the relation of pitch vs air hole diameter at λ_0 has been given. Simulations of the OPA in HF show that gain of OPA can reach 60 dB in only 20 m HF with pump power of 10 W, or the bandwidth of OPA can reach 300 nm.

Key words optoelectronics; holey fiber; dispersion; dispersion slope; optical parametric amplification

1 引言

近年来光纤中光学参量放大(OPA)^[1]的研究取得了巨大进展。文献[2]报道了在 500 m 的高非线性光纤(HNLF)中的 OPA 实验获得了 49 dB 的开/关增益(净增益 38 dB),而文献[3]报道了在 20 m 的 HNLF 中获得了带宽达 208 nm,增益超过 10 dB 的 OPA。OPA 是利用光纤中的非线性特性 $\chi^{(3)}$ 而产生四波混频(FWM)的过程,其相位匹配条件在光纤的零色散波长(λ_0)附近可以得到满足。为了获得较高效率的 OPA,光纤的非线性系数 γ 需要足够大,目前 OPA 的增益介质主要采用 HNLF,其非线性系数 γ 约为 $11 \sim 15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,这比普通单模

光纤(SMF),色散位移光纤(DSF)和色散补偿光纤(DCF)^[1]要高出许多。

近来光子晶体光纤(HF)以其独特的性能给 OPA 带来了新的途径。光纤中的非线性系数 $\gamma = n_2/A_{\text{eff}}$,如果降低光纤的有效面积 A_{eff} ,则可提高 γ ,例如,目前 HF 的 A_{eff} 可以做到 $3 \mu\text{m}^2$ 以下,而 γ 可达 $50 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 。由于 HF 的 γ 可以很大,因此其在 OPA 中应用前景广阔。文献[4]报道了在 HF 中进行的第一个 OPA 实验,采用的 HF 长度为 6 m, λ_0 在 750 nm 附近,在峰值功率 6 W 的条件下获得 13 dB 的增益。

本文将主要讨论在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段进行 OPA 的可能。根据文献[5,6]的方法,采用厄密-高斯函数

收稿日期:2002-10-30;收到修改稿日期:2002-12-05

作者简介:倪屹(1970—),男,清华大学电子工程系讲师,博士,主要从事光电子研究。E-mail:niy@tsinghua.edu.cn

(Hermite-Gaussian)来模拟光波在六角形 HF 中的传输。

2 色散计算

采用厄密-高斯函数展开的方法^[2,3]来计算 HF 中的色散。光纤结构如图 1 所示, d 为气孔直径, Λ 为相邻气孔中心的距离。

光纤的零色散波长 λ_0 是 OPA 非常重要的参

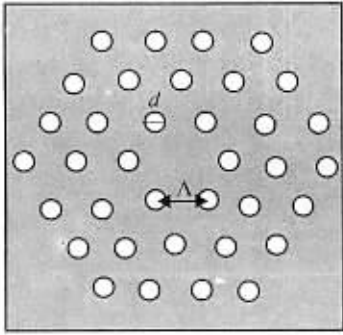


图 1 光子晶体光纤结构示意图

Fig. 1 Cross section of photonic crystal fiber

量, 计算表明当 HF 的 Λ 在 $1.1 \mu\text{m}$ 和 $2.6 \mu\text{m}$ 之间时, HF 的 λ_0 位于 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, 图 2 给出了 λ_0 处 Λ 和 d/Λ 的关系曲线。从图 2 可以看出, 随着 d/Λ 的减小, Λ 在增加, 也就是 HF 的 A_{eff} 在增加, 因此非线性系数 γ 在减小, 另外计算表明随着 Λ 的增加, λ_0 处的色散斜率在减小。这些结果对采用光子晶体光纤进行光学参量放大具有重要意义, 例如, 为了获得较高的增益, 需要选择较小的 Λ 以使 γ 较大; 相反地, 大的 Λ 可以使 λ_0 处的色散斜率较小, 从而可能实现宽带的 OPA。图 3 给出了图 2 中两个端点 ($\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$ 和 $2.6 \mu\text{m}$) 对应的色散曲线。

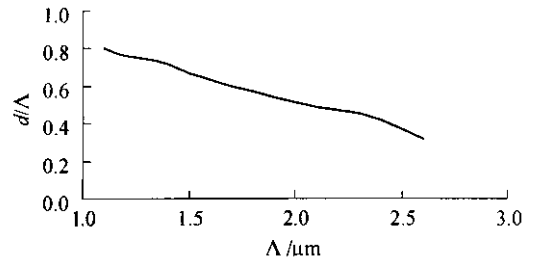


图 2 λ_0 处 Λ 和 d/Λ 的关系曲线

Fig. 2 Relationship between Λ and d/Λ at λ_0

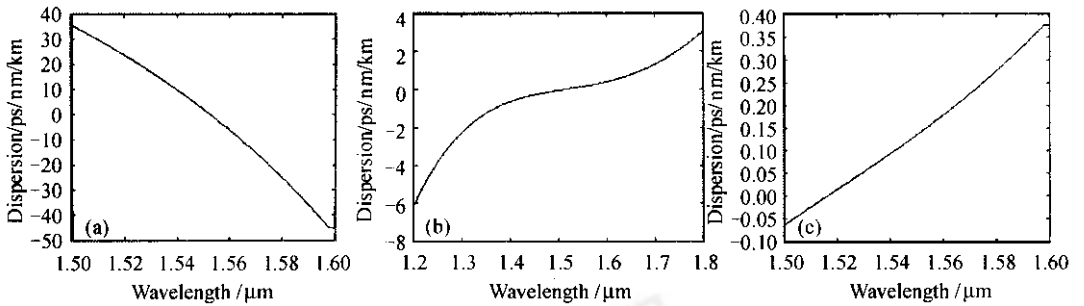


图 3 (a) $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$ 的色散曲线; (b) $\Lambda = 2.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.317$ 的色散曲线;

(c) 图(b)中 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 部分的色散曲线

Fig. 3 (a) Dispersion of HF with $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$; (b) Dispersion of HF with $\Lambda = 2.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.317$;

(c) Fine picture of (b) from $1.5 \mu\text{m}$ to $1.6 \mu\text{m}$

3 OPA 模拟

描述 OPA 可以用以下的微分方程组

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha P_p - 4\gamma \sqrt{P_p^2 P_s P_i} \sin\theta \quad (1)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha P_s + 2\gamma \sqrt{P_p^2 P_s P_i} \sin\theta \quad (2)$$

$$\frac{dP_i}{dz} = -\alpha P_i + 2\gamma \sqrt{P_p^2 P_s P_i} \sin\theta \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \Delta k_0 + \gamma [2P_p - P_s - P_i + (\sqrt{P_p^2 P_i / P_s} +$$

$$\sqrt{P_p^2 P_s / P_i} - 4 \sqrt{P_s P_i}) \cos\theta] \quad (4)$$

这里 P_p, P_s, P_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的功率, α 为光纤的损耗, $\theta = \Delta k_0 z + \phi_s + \phi_i - 2\phi_p, \phi_p, \phi_s$ 和 ϕ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的相位, Δk_0 为线性相位失配

$$\Delta k_0 = -\frac{2c\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0) (\lambda_p - \lambda_s)^2 \quad (5)$$

这里 D 为光纤色散, λ_p 和 λ_s 分别为抽运光和信号光的波长。通过求解微分方程组(1)~(4), 就可以获得光纤中 OPA 的增益。

根据前面的模型编写了程序, 对 HF 中的 OPA 进行模拟。

首先选择 HF 的参量为 $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$, A_{eff} 大约为 $1.5 \mu\text{m}^2$, γ 大约为 $100 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 保守地, 设 $\gamma = 50 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 损耗设为 87 dB/km (根据文献[1]), 从图 3(a) 可以看出, λ_0 为 $1.555 \mu\text{m}$, 因此选择抽运波长 λ_p 为 $1.553 \mu\text{m}$, 峰值功率设为 10 W , 光纤长度设为 20 m (与文献[2]中条件相同), 其小信号 (约 $1 \mu\text{W}$) 增益见图 4(a), 最大增益超过了 60 dB 。此例表明由于 HF 可具有很高的非线性, 其 OPA 增益可以得到显著提高。

然后, 考虑另外一例: $\Lambda = 2.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.317$, 其 A_{eff} 大约为 $15 \mu\text{m}^2$, γ 大约为 $12 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 损耗同样设为 87 dB/km 。从图 3(b), (c) 可以看出其 λ_0 为 1520 nm , 并且在 $1.5 \mu\text{m}$ 的区域内其色散斜率非常小 (大约为 $0.004 \text{ ps/nm}^2 \text{ km}$), 这意

味着在此区域内可获得宽带的 OPA。同样设峰值功率为 10 W , 光纤长度为 20 m , 抽运波长 λ_p 设为 $1.525 \mu\text{m}$ 。此时 HF 的增益如图 4(b) 所示, 增益带宽超过了 300 nm 。需要说明的是, 当 λ_p 非常接近 λ_0 时, 需要考虑四阶色散的影响, 此时的增益带宽会减小, 在我们的模型中没有考虑四阶色散, 模拟结果给出了 HF 中 OPA 的趋势, 可以作为设计实验时的参考。由于 HF 灵活的色散特性, 可以根据需要设计出色散和色散斜率均很小的 HF, 使 FWM 的相位匹配条件在很宽的范围内均能满足, 从而获得宽带的 OPA。此例中的 HF 仅为 20 m , 计算表明, 随着 HF 长度的增加, 可以获得更高的增益, 例如当长度为 100 m 时, 最大增益可达 28 dB 。

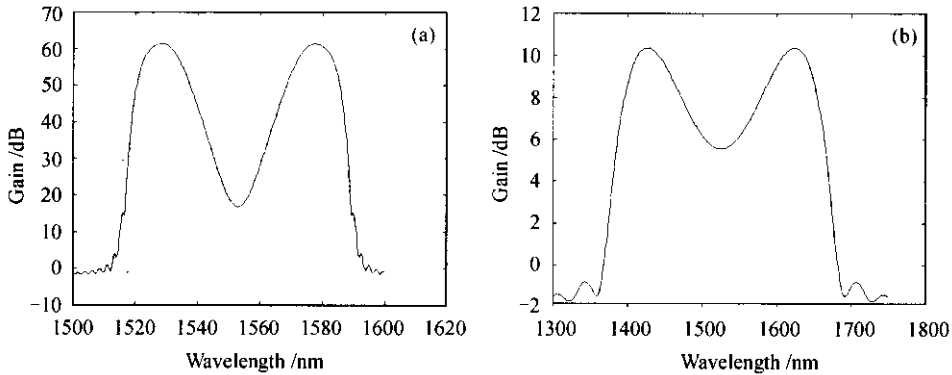


图 4 (a) $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$ 时 HF 的增益; (b) $\Lambda = 2.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.317$ 时 HF 的增益 (HF 长度均为 20 m)
Fig. 4 (a) Gain of HF with $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$; (b) Gain of HF with $\Lambda = 2.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.317$ (Fiber length is 20 m)

目前由于工艺还不够成熟, 因此 HF 损耗较大, 随着人们对 HF 工艺的深入研究, 其损耗将会逐步下降, 因此 OPA 增益将进一步增加, 这表明 HF 在 OPA 的研究中极具潜力。

4 结 论

本文计算了六角形结构 HF 的色散, 发现当气孔间距 $1.1 \mu\text{m} \leq \Lambda \leq 2.6 \mu\text{m}$ 时, HF 的零色散波长 λ_0 位于 $1.55 \mu\text{m}$ 区域, 并给出了零色散波长时气孔间距和气孔大小的关系曲线。并对 HF 中的 OPA 进行了理论模拟, 计算表明在 20 m 的 HF 中, 当峰值功率为 10 W 时, OPA 的增益可达 60 dB , 或可获得 300 nm 增益带宽。模拟计算表明了 HF 在现代光通信中具有非常广阔的应用前景, 如参量放大、波长转换等。

万方数据

参 考 文 献

- 1 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3):506~520
- 2 J. Hansryd, P. A. Andrekson. Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):194~196
- 3 M.-C. Ho, K. Uesaka, Y. Akasaka *et al.*. 200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7):977~981
- 4 J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1048~1050
- 5 T. M. Monro, D. J. Richardson, N. G. R. Broderick *et al.*. Holey optical fibers: an efficient modal model [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(6):1093~1102
- 6 T. M. Monro, D. J. Richardson, N. G. R. Broderick *et al.*. Modeling large air fraction holey optical fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1):50~56