

单频保偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射 实验研究

刘 驰¹ 冷进勇³ 漆云凤¹ 周 军^{1*} 丁亚茜^{1,2} 董景星¹ 魏运荣¹ 楼祺洪¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 实验研究了单频单模保偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射(SBS)效应。采用前向抽运的两级级联掺 Yb 光纤放大器,研究了保偏光纤放大器中的受激布里渊散射的光谱变化特性。理论计算的单模光纤的布里渊频移和 SBS 阈值与实验测试的结果进行了比较。在光纤放大器前后两端观察到多级次的斯托克斯(Stokes)谱线和多级的反斯托克斯(anti-Stokes)谱线,这是由级联受激布里渊散射和四波混频过程产生的。

关键词 非线性光学;单频;线偏振;主振荡多级放大器;受激布里渊散射;四波混频

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502001

Stimulated Brillouin Scattering in Single-Frequency, Single-Mode, Linearly Polarized Ytterbium-Doped Fiber Amplifier

Liu Chi¹ Leng Jinyong³ Qi Yunfeng¹ Zhou Jun¹ Ding Yaqian^{1,2}
Dong Jingxing¹ Wei Yunrong¹ Lou Qihong¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Experimental results for the stimulated Brillouin scattering (SBS) in the single-frequency, single-mode, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier are reported. The fiber amplifier configuration comprises of two-stage master oscillator power amplifier with co-propagating signal and pump light. The evolution of SBS spectra is investigated in the experiments. Multiorder Stokes and anti-Stokes scattering can be observed in the forward and backward directions of the fiber amplifier, which generate through cascaded SBS and four-wave mixing process.

Key words nonlinear optics; single frequency; linearly polarized; master oscillator multi-stage power amplifiers; stimulated Brillouin scattering; four-wave mixing

OCIS codes 190.0190; 060.2320; 140.3510; 140.3480; 140.3615

1 引 言

高功率线偏振单频激光在重力波探测、遥感、激

光雷达、光参量振荡以及相干光束组束等众多领域具有重要作用^[1~3]。特别是在集成光学光纤相干通

收稿日期:2010-11-01; 收到修改稿日期:2010-12-08

基金项目:国家自然科学基金(60907045)和国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题。

作者简介:刘 驰(1978—),男,博士研究生,主要从事高功率双包层光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: xu.chil@hotmail.com

导师简介:楼祺洪(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学、激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: junzhousd@siom.ac.cn

信、光纤传感器和光纤陀螺仪的应用中,需要光束有良好的偏振稳定以保证系统高性能^[4,5]。由于通过激光振荡器直接实现单频输出的激光功率较低^[6,7],以小功率单频激光为种子光源,以掺杂光纤为放大器的主振荡功率放大(MOPA)技术是实现高功率、单频激光输出的有效技术途径。基于大模场双包层掺 Yb 光纤的单频光纤放大器可以减小非线性效应等对放大功率提升的影响,目前已实现了功率在百瓦量级的单频、单模激光输出。然而,单频激光光纤放大中的受激布里渊散射(SBS)效应是限制其向高功率发展的关键技术瓶颈^[8~10]。在典型的双包层光纤放大器中需要足够长增益光纤吸收抽运光,很高的功率密度约束在单模光纤纤芯中很容易产生 SBS 非线性过程,光纤中的信号放大输出光将部分转换为后向的斯托克斯(Stokes)波,同时限制了放大信号光的最大输出。例如在相干组束中,SBS 的产生将对放大信号光产生严重的振幅和相位调制,进一步增加相干组束的技术难度^[11]。目前关于单频线偏振单模双包层掺 Yb 光纤放大器(YDFA)中 SBS 效应的研究报道较少,特别是全光纤化的光纤放大器中 SBS 的监测与分析。因此实验研究单频线偏振的全光纤放大器的 SBS 效应,对有效抑制 SBS,提高单频线偏振全光纤化放大器功率输出具有一定的意义。

本文实验研究了全光纤单频单模线偏振 YDFA 中的 SBS 效应。理论计算了单模光纤的布里渊频移和 SBS 阈值,并与实验测试的结果进行了

比较。

2 实验装置

实验结构图如图 1 所示,包括单频种子源 MO、预放大器(pre-amplifier)和功率放大器。种子源为一单频线偏振光纤激光器(DFB),中心波长 1063.8 nm,光谱线宽低于 20 kHz,偏振消光比约 20 dB,单模保偏尾纤输出功率约 5 mW。种子信号光经预放大器,功率放大到 100 mW 左右。在功率放大器信号光输入端熔接 1:99 的 2×2 保偏耦合器。在 A 端口,实时监测功率放大器后向散射功率和光谱,并判断 SBS 的产生和变化。在 B 端口,实时监测预放大器的光谱和功率稳定性。每级放大器间的隔离器可以抑制放大器系统中的寄生振荡以保护预放大器,甚至种子源。在功率放大器中, $(2+1) \times 1$ 保偏光纤耦合器用于耦合抽运光和预放大器的放大信号光。4 个波长稳定的 976 nm 激光二极管(LD)组成抽运源,单个最大带尾纤输出功率为 4 W,芯径/包层的直径为 105/125 μm ,数值孔径(NA)为 0.22。每 2 个 LD 经过一多模合束器合束后再分别与 $(2+1) \times 1$ 保偏耦合器的抽运光纤熔接。功率放大器中的增益光纤为 Nufern 的熊猫保偏掺 Yb 双包层光纤,长为 12 m,纤芯为 5 μm ,内包层直径为 130 μm ,对应的数值孔径分别为 0.14 和 0.46。增益光纤在 976 nm 的抽运吸收系数为 1.7 dB/m,增益光纤输出端也熔接隔离器用于抑制放大器系统的寄生振荡。

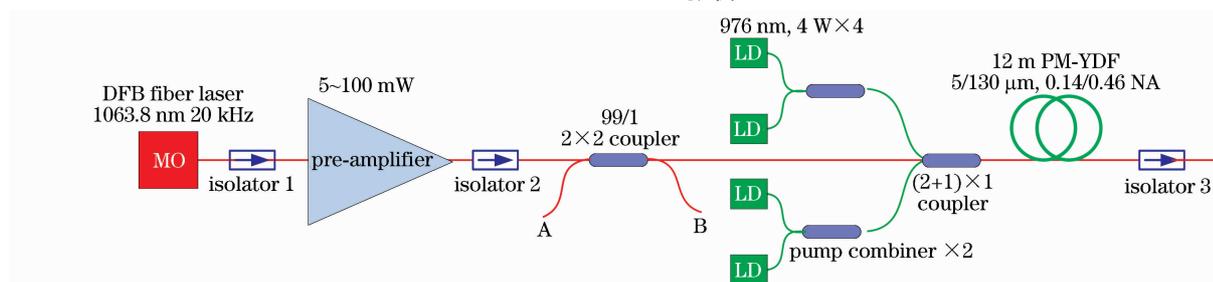


图 1 单频单模线偏振 YDFA 实验结构图

Fig. 1 Configuration of single frequency, single mode and linearly polarized YDFA

3 实验结果及分析

实验中观察到 SBS 的产生和发展。图 2 为放大信号输出功率和后向散射功率与抽运光功率曲线关系。圆点表示前向放大功率,方块表示放大器后向散射功率[包括瑞利散射、放大自发辐射(ASE)以及 SBS Stokes 波]。在抽运光功率逐渐增加的过程中,后向散射功率有一个陡然上升点,表明 SBS 开

始发生,此后,后向散射功率迅速上升,同时放大器的放大信号光的斜率效率慢慢下降,并且出现功率波动的不稳定性,这表明放大器光纤中产生严重的非线性过程。值得注意的是,由于 1:99 的 2×2 光纤耦合器,放大器产生的后向散射功率应该是 A 端口监测功率的 100 倍左右。后向功率的变化证实了 SBS 的产生和发展,后向监测的光谱的变化可准确

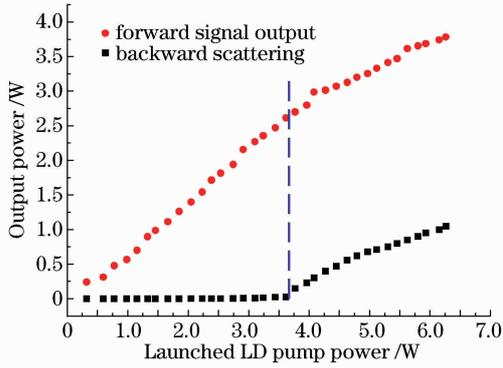


图 2 放大信号输出功率和后向散射功率与抽运光功率的关系

Fig. 2 Amplified signal output power and backward scattering power versus the launched LD pump power

阐述 SBS 产生的详细过程,特别是 SBS 阈值附近的光谱变化对 SBS 阈值的确定具有指导意义。

在 SBS 阈值附近的后向散射光谱如图 3 所示。后向散射光谱中包括两个峰,左边的波峰为信号光的瑞利散射谱线,波长为 1063.8 nm,跟信号光一致。右边的波峰为 SBS 第一级 Stokes 谱线,相对于瑞利散射谱线产生了约 0.06 nm 的红移。在单模光纤中,布里渊频移为^[12]

$$\nu_B = 2n_s v_A / \lambda_s, \quad (1)$$

式中 n_s 为放大信号光波长 λ_s 处的有效模折射率。若取声速 $v_A = 5.96$ m/s, $n_s = 1.45$, 在 $\lambda_s = 1063.8$ nm 处,布里渊频移 $\nu_B = 16.24$ GHz,即对应的波长移动约 0.06 nm,实验测试值与理论计算值完全吻合。

关于 SBS 的阈值估算,采用 R. G. Smith^[13] 提出的理论估算法,之后 Sébastien Le Floch 等^[14] 进一步改进了理论模型,这些阈值估算都可以用一个通用模型

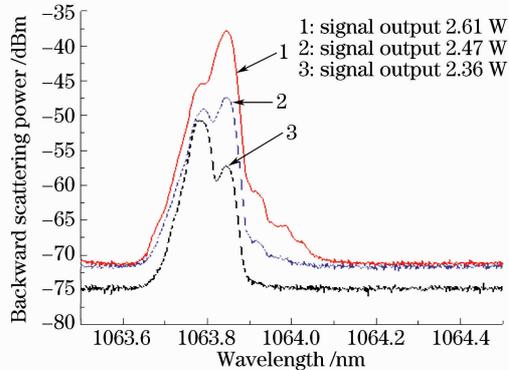


图 3 在 SBS 阈值附近的后向散射光谱

Fig. 3 Spectra of backward scattering light in the neighborhood of the SBS threshold

$$g_B P_{th} L_{eff} / A_{eff} \approx 21, \quad (2)$$

式中 P_{th} 为布里渊散射阈值, A_{eff} 为光纤纤芯的有效截面积, g_B 为布里渊峰值增益,有效光纤长度

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha. \quad (3)$$

式中 α 为放大器的损耗系数,但该模型主要是针对光在无源光纤内的传输,对于光纤放大器而言,信号光是沿光纤逐渐增长的,考虑放大器的增益,同时考虑到增益光纤输出后接光纤隔离器, L_{eff} 需进行相应的修正

$$L_{eff} = \{ \exp[(g - \alpha)L] - 1 \} / (g - \alpha). \quad (4)$$

若增益 g 沿光纤均匀分布,并忽略放大器的损耗,则(4)式简化为

$$L_{eff} = [\exp(gL) - 1] / g. \quad (5)$$

若再考虑到增益光纤输出后接光纤隔离器,设光纤隔离器的传能光纤长度为 L_d ,则(2)式可以扩展为

$$g_B P_{th} (L_{eff} + L_d) / A_{eff} \approx 21. \quad (6)$$

为估算 SBS 阈值功率,首先考虑增益光纤的长度,实验中增益光纤在 976 nm 的抽运吸收系数为 1.7 dB/m,12 m 的吸收为 20.4 dB,抽运光在增益光纤尾端几乎不增长,因此尾端 1 m 光纤可以近似作为传能光纤处理。光纤隔离器传能光纤 1.5 m,增益光纤模场直径 6.5 μm , $g_B = 5 \times 10^{-11}$ m/W,则由(6)式可求出 SBS 阈值功率约为 2.4 W。实验中得到的 SBS 阈值功率约为 2.5 W,理论和实验结果基本一致。

从后向功率监测可以大致判断 SBS 的阈值,后向散射光谱可以准确判断 SBS 阈值。由图 3 可知,当放大信号光功率低于 SBS 阈值为 2.36 W 时,此时后向光谱中,瑞利散射谱线占优势为主峰,SBS 第一级 Stokes 谱线只刚出现一小侧峰,低于主峰约 8 dB。当放大信号光功率达到 SBS 阈值后为 2.47 W 时,后向散射功率突然上升,同时后向光谱中第一级 Stokes 谱线峰幅度开始超过瑞利散射谱线峰幅度时,可以认为此时的放大信号光功率值即为放大器的 SBS 阈值。当放大信号光功率高于 SBS 阈值为 2.61 W 时(顶部光谱),此时后向光谱中,第一级 Stokes 谱线转而占优势为主峰,而瑞利散射谱线则变成一小侧峰,甚至淹没在第一级 Stokes 谱线主峰内。需要指出的是,在后向光谱监测过程中,在一定的抽运功率下,各谱线的峰强度在一段时间内有一定起伏,这表明 SBS 不是一个稳态过程。

在 SBS 过程初始阶段,在放大器后向散射光谱中仅仅只能观察到信号光的瑞利散射谱线和第一级

Stokes 谱线,且谱线峰幅度起伏小,此时前向放大功率稳定,没出现起伏,后向产生的 Stokes 功率远小于前向放大功率。随着抽运光功率逐渐加大,在后向散射光谱中可以看到多级次 Stokes 谱线,当抽运光功率再进一步加大,后向光谱中将出现更多级高级次 Stokes 谱线,甚至还出现了多级次反斯托克斯(anti-Stokes)谱线。前向放大功率出现严重波动,振幅波动达到 30%~40%,这是因为后向的 Stokes 波从前向放大信号光中转移了一部分功率。如果在光纤放大链路中没有有效的回光隔离措施,那么此时严重的后向 Stokes 波可能已经对光纤放大器造成了一定损伤。实验中全光纤放大器采用前向抽运结构,这主要是考虑到全光纤化的抽运光和信号光耦合器的安全可靠。如果使用后向抽运的结构,则耦合器的纤芯和包层区域都需要传输较高的功率,特别是容易损坏的纤芯区域,给耦合器的散热带来很大的压力,因此在实际全光纤放大器实验中,往往避免使用后向抽运方式。而使用前向抽运结构,就可以避免在耦合器的纤芯区域传输较高的功率,耦合器纤芯只有前端放大的种子光经过信号光和抽运光同向传播。如果采用空间耦合抽运光的方式,那么采用反向抽运结构,可以有效减轻 SBS 对光纤放大器的影响。

在采用前向抽运结构全光纤放大器中,在 A 端口监测的后向散射光谱中的 Stokes 谱线和 anti-Stokes 谱线为奇数级次(1st, 3rd, 5th, ...),如图 4 所示。同时在放大器放大信号输出端监测到多级的 Stocks 谱线和 anti-Stocks 谱线为偶级次(2nd, 4th, 6th, ...),如图 5 所示。图 4,5 中光谱均为放大信号平均光功率为 3.5 W 时监测的光谱,由于此时出现严重 SBS 现象,放大信号功率显示出极不稳定性。

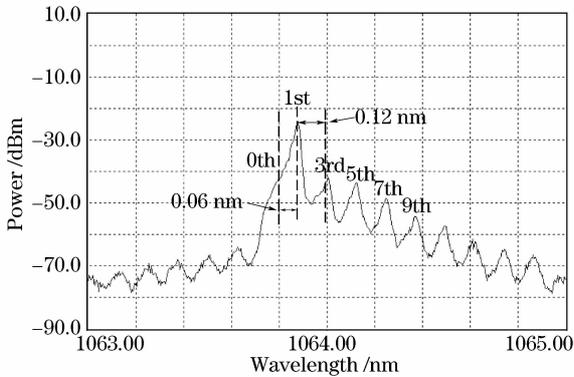


图 4 功率放大器后向散射光谱

Fig. 4 Spectrum of the power amplifier in backward direction monitored at the spare port A

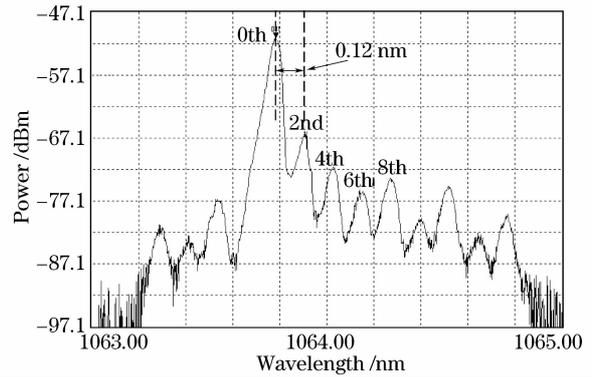


图 5 功率放大器前向输出端光谱

Fig. 5 Spectrum of the power amplifier in forward direction at amplified signal output port C

图 4 中在 2 nm 的光谱扫描范围内出现 10 条 Stokes 谱线和 5 条 anti-Stocks 谱线。主峰为第一级 Stokes 谱线,此时的信号光的瑞利散射谱线峰(可作为 0th Stokes 谱线)已经淹没在第一级 Stokes 谱线主峰内不可分辨,而且第一级 Stokes 谱线峰幅度比相邻的第三级 Stokes 谱线幅度高约 18 dB。所有的 Stocks 谱线幅度均超过 anti-Stocks 谱线幅度,而且每级次的谱线幅度由低级次向高级次逐渐减少。每相邻谱线间隔约为 0.12 nm。

图 5 中在 2 nm 的光谱扫描范围内,除了放大的信号光谱线,还观察到 8 条 Stocks 谱线和 3 条 anti-Stocks 谱线,每相邻谱线间隔也为 0.12 nm。前后向出现的相同谱线间隔对应于 2 倍布里渊频移 ν_B 。相邻级次 Stokes 谱线间产生 ν_B 频移

$$\nu_B = \nu_{s_i} - \nu_{s_{i+1}}, \quad (7)$$

而相邻偶级次(或奇级次)将产生 2 倍 ν_B 频移。每一级次的 Stokes 波通过 SBS 过程从相邻的低一级的 Stokes 波获得能量,当本身的能量积累一定程度,再经过 SBS 过程向相邻的更高一级的 Stokes 波转移能量。因而 SBS 过程能够产生一系列 Stokes 谱线,且相邻级次之间的传播方向相反。图 4,5 光谱中多级高频 anti-Stocks 谱线归因于放大器中的四波混频(FWM)非线性过程。两束相邻级次的光相互作用可以产生一束频率增加 ν_B 的 anti-Stocks 光和一束频率减少 ν_B 的 Stocks 光

$$\begin{cases} 2\nu_{s_i} - \nu_{s_{i+1}} = \nu_{s_i} + \nu_B \\ 2\nu_{s_{i+1}} - \nu_{s_i} = \nu_{s_{i+1}} - \nu_B \end{cases} \quad (8)$$

因此由于 SBS 和 FWM 过程,光束之间相互作用可以产生连续的高级次 Stokes 谱线和 anti-Stokes 谱线。光纤放大器前后向光谱中的多级次 Stokes 谱线和 anti-Stokes 谱线是级联 SBS 和

FWM 过程相结合产生的结果, 其中低级次的 Stokes 谱线主要由级联 SBS 过程产生, 高级次的 Stokes 谱线和 anti-Stokes 谱线由 FWM 过程产生。

4 结 论

实验研究了单频单模线偏振 YDFA 中的 SBS。光纤放大器为两级 MOPA 系统。实验中研究了 SBS 光谱变化。理论计算的单模光纤的布里渊频移和 SBS 阈值与实验测试的结果基本一致。当后向散射光谱中第一级 Stokes 谱线峰幅度等于瑞利散射谱线峰幅度时, 可以认为此时的放大信号光功率值即为放大器的 SBS 阈值。同时在光纤放大器的前后向观察到多级 Stokes 谱线和 anti-Stokes 谱线。这是由级联 SBS 和 FWM 过程相结合产生的结果。相邻谱线间隔线宽约为 0.12 nm, 对应于 2 倍的布里渊频移。

参 考 文 献

- 1 Gerald T. Moore. Binary coherent beam combination with mirror pairs [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(30):6399~6409
- 2 S. Saraf, S. Sinha, A. K. Sridharan *et al.*. Power scaling of diffraction limited, single frequency lasers for LIGO [C]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 2003, **83**:426
- 3 Xue Yuhao, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Passive coherent beam combination of four Yb-doped fiber lasers in two-dimensional distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9):2314~2317
薛宇豪, 周 军, 何 兵等. 四路二维掺镱光纤激光被动相干光束实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9):2314~2317
- 4 Li Peng, Zhao Zhimin, Hong Xiaoqin. Design and study on a new fiber sensor with self-repairing functions [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):573~576
李 鹏, 赵志敏, 洪小芹. 新型快速自修复光纤传感器的设计与性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):573~576
- 5 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1529~1533
张旭琳, 马慧莲, 丁 纯等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1529~1533
- 6 Anting Wang, Hai Ming, Feng Li *et al.*. Single-frequency, single-polarization ytterbium-doped fiber laser by self-injection locking [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4):223~225
- 7 Martin Engelbrecht, Axel Ruehl, Dieter Wandt *et al.*. Single-frequency ytterbium-doped fiber laser with 26 nm tuning range [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8):4617~4622
- 8 A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1537~1539
- 9 D. N. Payne, Y. Jeong, J. Nilsson *et al.*. Kilowatt-class single-frequency fiber sources [C]. *SPIE*, 2005, **5709**:133~141
- 10 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3):546~551
- 11 N. A. Brilliant. Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(11):2551~2557
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3th ed., New York: Academic Press, 2001
- 13 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11):2489~2494
- 14 Sébastien Le Floch, Pierre Cambon. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6):1132~1137