

文章编号: 0258-7025(2008)07-0987-05

基于干涉环结构的调 Q 光纤激光器

黄琳¹ 代志勇¹ 刘永智¹ 张谦述^{1,2}

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 西华师范大学物理与电子信息学院, 四川 南充 637002)

摘要 从光纤干涉环中受激瑞利散射(SRS)和光纤中受激布里渊散射(SBS)共同作用调 Q 的原理出发,研究了光纤干涉环耦合比及环长对调 Q 光纤激光器输出激光特性的影响。分别采用耦合比为 50:50, 80:20, 90:10 的光纤干涉环在不同环长下搭建掺 Er³⁺ 调 Q 光纤激光器进行实验。实验结果表明,干涉环的耦合比和环长是影响输出激光特性的关键因素,耦合率(~10%)的干涉环适宜产生脉冲激光,具有高耦合比干涉环的光纤激光器只有连续激光输出;环长根据干涉环耦合率(~10%)在 2 m 附近调整可以获得理想脉冲激光输出,环长过短时产生输出激光的弛豫振荡,反之产生输出激光脉冲的分裂。采用耦合比为 90:10,环长为 2 m 的光纤干涉环时,在 37 mW 的抽运功率下获得脉宽 7.2 ns,重复频率 212.4 kHz,输出功率 5.4 mW 的脉冲激光,脉冲波形较好,峰值功率有~30% 的波动。

关键词 激光技术;光纤激光器;调 Q 光纤激光器;受激布里渊散射;受激瑞利散射

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.0987

Q-Switched Fiber Laser with a Ring Interferometer

Huang Lin¹ Dai Zhiyong¹ Liu Yongzhi¹ Zhang Qianshu^{1,2}

(¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² Department of Physics and Electronic Information, West China Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China)

Abstract The co-operation of stimulated Rayleigh scattering (SRS) in fiber interference loop and stimulated Brillouin scattering (SBS) in fiber can change Q value in resonant cavity, based on which an all-fiber Er-doped Q-switched fiber laser with interference loop is designed. In the experiments, the attributes of output laser exploiting interference loops with different coupling ratios and lengths were investigated. A train of pulse laser with pulse duration of 7.2 ns, repetitive frequency of 212.4 kHz, average output power of 5.4 mW at pump power of 37 mW was obtained which had a good waveform and a peak power fluctuation of ~30%. The results show that the interference loop with very high coupling ratio has no contribution to the generation of pulse laser and the coupling ratio of ~10% is suitable for it. Even if the coupling ratio of ~10% is chosen, the length of the loop has influence on the attribute of the output laser pulse and good output can be obtained at the length around 2 m.

Key words laser technique; fiber laser; Q-switched fiber laser; stimulated Brillouin scattering; stimulated Rayleigh scattering

1 引言

调 Q 光纤激光器可以产生高功率和脉宽从几纳米到几百纳米的脉冲激光,这种短脉冲激光在测距、光时域反射仪(OTDR)、通信系统、远程传感、高速全息照相、军事和医疗等方面被广泛应

用^[1-6]。对于普通调 Q 光纤激光器,提高脉冲峰值功率的一个有效途径是减小与腔长成正比的脉冲宽度。使用短腔长可以减小脉冲宽度,但会因为增益光纤的缩短而减少其中的可提取能,因为可提取能依赖于增益光纤中的掺杂粒子数和掺杂粒子的上能

收稿日期:2007-09-18; 收到修改稿日期:2007-12-26

基金项目:总装预研基金(51302060101)和国防重点实验室基金(51472040205DZ0201)资助项目。

作者简介:黄琳(1977—),女,重庆人,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器和放大器方面的研究。

E-mail: linhuang_568@uestc.edu.cn

导师简介:刘永智(1942—),男,四川人,教授,博士生导师,目前主要从事光纤传感与光信息处理方面的研究。

E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

级寿命。采用高掺杂光纤可以在保证可提取能的基础上减小脉冲宽度,但是光纤中掺杂浓度过高又会造成浓度猝灭等问题;另一个途径是增加光纤中的可提取能,采用大模场光纤是一种不错的选择^[7~9],但是需要采用透镜将抽运光耦合进光纤,从而带来较大的插入损耗。光纤干涉环中受激瑞利散射(SRS)和光纤中的受激布里渊散射(SBS)共同作用可以实现光纤激光器的调Q。SRS提供的反馈激发SBS, SBS产生的斯托克斯(Stokes)脉冲可以对激光器提供瞬时强反馈将腔内Q值提高几个数量级。利用这种原理可以获得脉宽小于10 ns,峰值功率达到千瓦量级的激光脉冲^[10,11]。

本文从SRS和SBS共同作用调Q的原理出发,对带有光纤干涉环的掺 Er^{3+} 调Q激光器进行实验研究,分析了不同耦合比的光纤干涉环对输出激光特性的影响及其原因。

2 受激瑞利散射和受激布里渊散射共同作用调Q的原理

光纤干涉环中SRS和光纤中的SBS共同作用实现调Q的过程可以描述为:抽运建立粒子数反转,使增益逐渐增加,但由于采取适当方法抑制了腔内反馈,所以腔内Q值很低,激光不能形成,只是不断增加反转粒子数;同时,干涉环中的受激瑞利散射向腔内提供反馈,放大自发辐射(ASE)光通过干涉环时与其中的某些频率谐振,从而提高了这些谐振模式的散射光强,即,使得这些模式的反馈增强;尽管干涉环的受激瑞利散射系数相当低,但往返通过增益光纤所获得的动态增益足够高,以至往返通过增益光纤后得到受激放大的ASE光可以达到激光阈值,形成激光;腔内激光模式中只有和干涉环里的谐振模式匹配才能在增益光纤中继续得到放大,经往返增益后重新回到干涉环,从这个角度来说,受激瑞利散射压窄了激光线宽,为激发SBS脉冲创造了条件;达到激光阈值的模式在腔内不断往返,能量提高,从而达到SBS阈值,激发Stokes脉冲,Stokes脉冲的形成引发了一系列的雪崩过程,将腔内Q值瞬间提高几个数量级,从而带出了绝大多数增益光纤中的可提取能,以巨脉冲的形式输出。

受激瑞利散射提供的反馈是决定激光脉冲输出的关键因素,过强,腔内形成连续激光振荡;过弱,往返经过增益光纤的ASE光达不到SBS激发阈值,不能激发Stokes脉冲。

对Andrei A. Fotiadi等提出的耦合SRS和SBS的瞬时空间方程^[12]作简化为

$$\frac{n}{c} \frac{\partial E_P}{\partial t} + \frac{\partial E_P}{\partial z} = -\frac{g}{2S} \rho E_S - \mu E_P, \quad (1a)$$

$$\frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} - \frac{\partial E_S}{\partial z} = \frac{g}{2S} \rho^* E_P + \eta_1(z) E_R - \mu E_S, \quad (1b)$$

$$\frac{n}{c} \frac{\partial E_R}{\partial t} + \frac{\partial E_R}{\partial z} = \eta_2(z) E_S - \mu E_R, \quad (1c)$$

$$T_2 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho = E_P E_S^* + f(z, t), \quad (1d)$$

光功率 $P = EE^*$,式中 E_S 为斯托克斯光场强度, E_R 为瑞利光场强度, E_P 为抽运光场强度, g 为SBS增益系数, S 为光纤的有效模场面积, c 为真空中光速, n 为光纤折射率, T_2 为声波的弛豫时间, μ 为线性损耗系数,在有干涉环结构的光纤激光器中随干涉环长度增加而增加。朗万噪声 $f(z, t)$ 和瑞利后向散射系数 $\eta_{1,2}(z)$ 符合高斯随机过程

$$\langle f(z, t) \rangle = 0, \quad (2a)$$

$$\langle f(z, t) f^*(z', t') \rangle = Q \delta(z - z') \delta(t - t'), \quad (2b)$$

$$\langle \eta_{1,2}(z) \rangle = 0, \quad (3a)$$

$$\langle \eta_1(z) \eta_1^*(z') \rangle = \langle \eta_2(z) \eta_2^*(z') \rangle = \Lambda_R \delta(z - z'), \quad (3b)$$

$$\langle \eta_1(z) \eta_1^*(z) \rangle = \langle \eta_2(z) \eta_2^*(z) \rangle = 2k\mu, \quad (3c)$$

式中 Λ_R 为瑞利后向反射系数; $Q = 2k_B T \rho_0 \Gamma / v^2 A$ 为噪声强度参量, Γ 为声子衰减速率, ρ_0 为SBS的平均密度, v 为介质声速, A 为作用面积, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, k 为后向瑞利俘获因子,与光纤结构有关, $k \approx 1/600$, $\langle \eta_{1,2}(z) \rangle$ 代表后向瑞利散射提供的反馈强度,随干涉环耦合率的增加而增加。

由方程(3c)看出, $\langle \eta_1(z) \rangle$, $\langle \eta_2(z) \rangle$ 随 μ 增加而增加,但 k 远远小于1,所以前两者增加的幅度远远小于 μ 增加的幅度,即 μ 和 $\langle \eta_{1,2}(z) \rangle$ 都随干涉环环长的增加而增加,但干涉环环长增加的结果只表现为损耗 μ 的增加;同时,提高干涉环耦合率可以提高 $\langle \eta_{1,2}(z) \rangle$ 。形成激光脉冲需要有匹配的 μ 和 $\langle \eta_{1,2}(z) \rangle$,因此,干涉环的耦合率和环长相匹配是决定脉冲激光输出的关键。

3 实验结果及讨论

建立如图1所示的掺 Er^{3+} 调Q光纤激光器。采用中心波长974 nm,最大输出功率250 mW的单模激光二极管抽运掺 Er^{3+} 光纤(EDF),长度3 m的掺 Er^{3+} 光纤为加拿大CorActive公司生产的EDF-L 1500,模场直径6 μm ,数值孔径0.25,对980 nm波

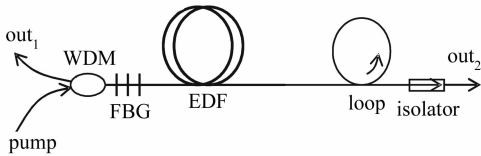


图1 带光纤干涉环的掺 Er^{3+} 调Q光纤激光器实验图

Fig.1 Schematic diagram of Er^{3+} -doped Q-switched fiber laser with interference loop

长的吸收系数为15 dB/m;光纤光栅(FBG)峰值反射波长1550.24 nm,峰值反射率99.23%;隔离器起到抑制后端面反射的作用。分别采用耦合比50:50,80:20,90:10的干涉环进行实验研究,得到不同耦合比干涉环对输出激光特性的影响;选择适宜激光脉冲输出的干涉环耦合比,分别在环长3 m,2 m,1 m的情况下进行实验,得到不同环长对输出激光特性的影响。采用光谱仪(ANDO6319)观察输出激光的时域特性,数字示波器(Tektronix TDS3052)观察脉冲波形,光功率计(ANDO AQ2140)监视其功率,自行设计的探测器对脉冲有20倍展宽作用以降低峰值功率,从而减小脉冲峰值功率过高对仪器的损害。

3.1 干涉环耦合比的选择

干涉环长选定为2 m,采用耦合比50:50和80:20的干涉环时在抽运功率(文中提到的抽运功率均指入纤抽运功率)为16.7 mW和21.3 mW时有连续激光输出,并且端口1输出激光功率远小于端口2,增大抽运功率仍然只有连续激光输出,这说明高耦合率干涉环中的SRS光对谐振腔提供了足够强反馈,形成连续激光振荡。采用90:10干涉环,在抽运功率37 mW时端口1有脉冲激光输出,端口2的光功率只有微瓦量级,脉冲形成后继续增大抽运功率,脉冲形状基本不变,重复频率和输出功率都略微增加。图2分别给出了采用环长2 m,耦合比50:50,

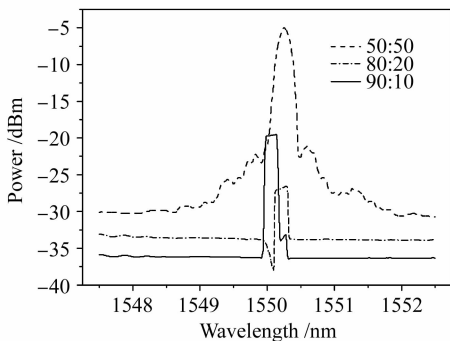


图2 不同耦合比的干涉环输出激光光谱图(环长2 m)

Fig.2 Spectrum of output laser with 50:50, 80:20, 90:10 interference loop, $l=2$ m

80:20,90:10的光纤干涉环时,在抽运功率37 mW下的输出激光光谱图。随着干涉环耦合率降低,输出激光光谱逐渐压窄,为产生SBS创造了条件。耦合比80:20时出现了部分光谱增益饱和现象,压窄了光谱;耦合比90:10时可以看出有微弱二阶SBS光脉冲产生。图3为采用50:50和80:20干涉环输出连续激光功率随抽运功率的变化,和采用50:50干涉环相比,采用80:20干涉环所需的抽运阈值高,输出连续激光的斜率效率高,符合线形腔光纤激光器输出耦合率与抽运阈值和斜率效率关系的理论。两种情况下的斜率效率分别为26%和17%。图4为在37 mW抽运功率下采用90:10干涉环得到的激光脉冲波形图,脉宽7.2 ns,脉冲重复频率212.4 kHz,输出功率5.4 mW,脉冲峰值功率约有30%的波动。图5为采用90:10干涉环,达到产生脉冲的抽运阈值后继续增大抽运功率,输出脉冲的重复频率和功率的变化。随着抽运功率的增加,脉冲重复频率和功率都略微增加。

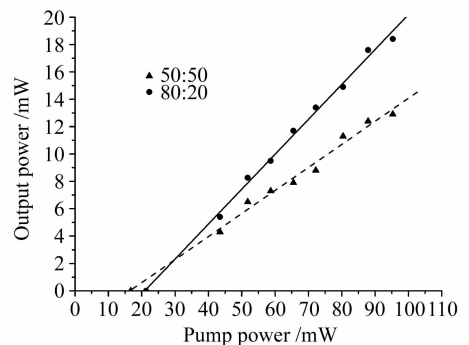


图3 不同耦合比的干涉环输出激光功率随抽运功率的变化

Fig.3 Relationship of output power and pump power with 50:50 or 80:20 interference loop, $l=2$ m

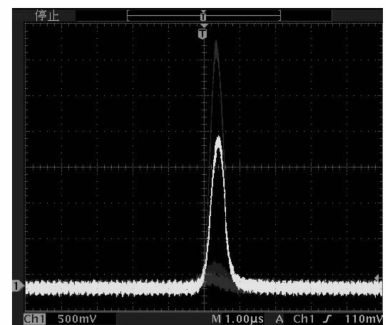


图4 耦合比90:10干涉环输出脉冲激光波形图(环长2 m)

Fig.4 Wave profile of output pulse laser with 90:10 interference loop, $l=2$ m

结合对SRS和SBS共同作用调Q原理的讨

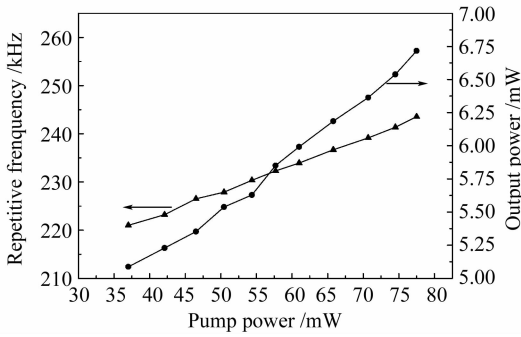


图5 耦合比 90:10, 环长 2 m 干涉环, 脉冲重复频率和输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Relationship of repetitive rate and pump power or output power and pump power, with 90:10 interference loop, $l=2$ m

论, 做出如下分析: 对于 SRS 光来说, 增加干涉环长度带来的损耗远远小于提高耦合率带来的加强, 即增加环长无助于降低高耦合率对谐振腔提供的 SRS 强反馈, 而正是这样的强反馈造成了激光的连续振荡。因此, 在选择耦合比的问题上, 对于耦合比 50:50 和 80:20 的干涉环, 排除了通过增加环长来大幅降低 SRS 反馈的可能性。根据以上分析, 耦合率 $\sim 10\%$ 的干涉环适合形成脉冲激光。

3.2 耦合率 $\sim 10\%$ 时干涉环环长的选择

采用适宜输出脉冲激光的 90:10 干涉环, 在环长 3 m, 2 m, 1 m 情况下对输出激光的特性进行研究。脉冲产生前光谱不稳定, 达到产生脉冲激光的抽运阈值后, 光谱趋于稳定。图 6 给出环长 1 m, 2 m, 3 m 时稳定的输出激光光谱。1 m 环长时没有脉冲激光产生, 从示波器上看到激光的弛豫振荡, 光谱出现明显压窄。原因是: 1 m 环中损耗较小, 因此 SRS 光对谐振腔的反馈较弱, 经过往返增益的 ASE 光处在激发 SBS 脉冲的阈值边缘。图 7(a) 给出了环长 1 m 时的激光波形图。2 m 和 3 m 环长情况下分别在抽运功率为 37 mW, 45 mW 时出现脉冲激光。原因是: 在 SRS 反馈能够满足 SBS 激发阈值的要求从而有激光脉冲输出的前提下, 环长越小, 系统线性损耗越小, ASE 光得到的受激放大越充分, 产生脉冲激光所需的抽运功率就越低。环长由 2 m 增加到 3 m, 输出激光光谱中出现较明显的二阶 SBS 光。原因是: 环长较长时由于损耗增加, 经过受激放大的 ASE 光达到 SBS 激发阈值所需的时间较长, 谐振腔内初始积累的光子数目较大, 从而产生的一阶 SBS 脉冲光功率高, 容易激发二阶 SBS 光脉冲。环长 3 m 时脉冲出现明显的双峰现象, 环长 2 m 时脉冲形状较好。这与 3 m 环长时二阶 SBS 光脉冲较强相对

应。图 7(b) 给出环长 3 m 时的输出激光脉冲波形, 环长 2 m 时的脉冲波形图由图 4 给出。

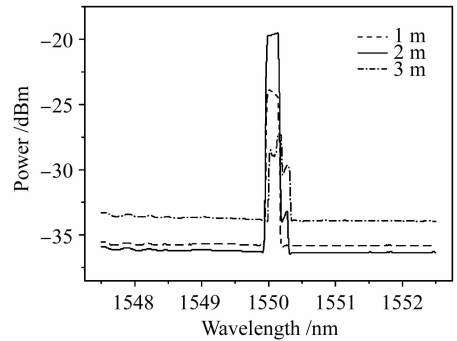


图6 耦合比 90:10 干涉环, 环长不同时的输出激光光谱图

Fig. 6 Spectrum of output laser with 90:10 interference loop, at $l=1$ m, 2 m, 3 m, respectively

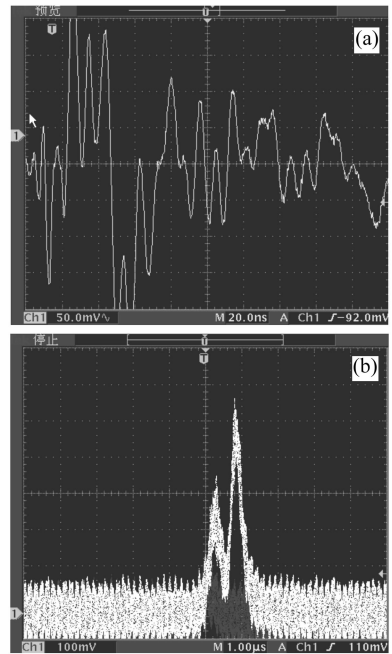


图7 耦合比 90:10 干涉环的输出脉冲激光波形图
(a) 环长 1 m; (b) 环长 3 m

Fig. 7 Wave profile of relaxation oscillation laser at $l=1$ m (a) and $l=3$ m (b) with 90:10 interference loop

4 结 论

对 SRS 和 SBS 共同作用下的调 Q 光纤激光器进行了理论和实验研究, 构造了带有光纤干涉环的掺 Er^{3+} 调 Q 光纤激光器。通过实验分析了干涉环耦合比和干涉环长度对输出激光特性的影响。得到脉冲激光产生与干涉环耦合率密切相关, 采用耦合率 $\sim 10\%$ 的干涉环比较适宜。耦合率过大, 干涉环中形成的 SRS 对谐振腔的反馈强, 容易形成激光振

荡,消耗腔内光子数目,输出连续激光,且增加环长无助于降低耦合率高带来的 SRS 光对谐振腔的强反馈。采用耦合率 $\sim 10\%$ 的干涉环,环长不同,输出激光特性不同。环长过长,产生脉冲激光的阈值抽运功率较高,容易激发高阶 SBS 光脉冲,造成脉冲分裂;环长过短,干涉环中的 SRS 损耗小,对谐振腔的反馈强,容易形成连续激光振荡。脉冲激光一旦形成,继续增大抽运功率对脉冲波形的影响较小,只是脉冲周期略微减小,输出功率略微增大。说明脉冲属性与 SBS 的动态机制有关,与抽运功率无关。产生的脉冲激光周期和峰值功率不稳定,可以用连续抽运与脉冲抽运结合对增益光纤进行双端抽运或用加声光调制器(AOM)的方法来稳频。

参 考 文 献

- 1 D. Zalvidea, N. A. Russo, R. Duchowicz *et al.*. High-repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(6):315~319
- 2 D. Sabourdy, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene *et al.*. Coherent combining of Q-switched fibre lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(20):1254~1255
- 3 T. V. Andersen, P. Pérez-Millán, S. R. Keiding *et al.*. All-fiber actively Q-switched Yb-doped laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1):251~256
- 4 Fang-Wen Sheu, Jung-Jui Kang. All-fiber actively Q-switched fiber laser tuned by a pair of temperature controlled fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **278**(1):132~137
- 5 Rao Haibo, Liao Yun, Cheng Jianbo *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched monolithic microchip laser based on liquid phase epitaxy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):90~93
饶海波,廖云,成建波等. 外延单片式激光二极管抽运被动调 Q 微激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):90~93
- 6 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and modelocking Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1021~1024
甘雨,向望华,周晓芳等. 被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1021~1024
- 7 Hongming Zhao, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. An acousto-optic Q-switched fiber laser using China-made double-cladding fiber [J]. *Chin Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):522~523
- 8 J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson *et al.*. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):37~39
- 9 C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, J. K. Sahu *et al.*. 7.7 mJ pulses from a large core Yb-doped cladding pumped Q-switched fiber laser [C]. CLEO 2001. 219
- 10 Z. J. Chen, A. B. Grudinin, J. Porya *et al.*. Enhanced Q switching in double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6):454~456
- 11 Ya-Xian Fan, Fu-Yun Lu, Shu-Ling Hu *et al.*. 105-kW peak-power double-clad fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5):652~654
- 12 Andrei A. Fotiadi, Patrice Megret, Michel Blondel. Dynamics of a self-Q-switched fiber laser with a Rayleigh-stimulated Brillouin scattering ring mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10):1078~1080