

文章编号: 0258-7025(2007)08-1043-05

激光二极管抽运复合腔和频连续波 589 nm 激光器

付喜宏^{1,2}, 檀慧明¹, 李义民^{1,2}, 郝二娟^{1,2}, 钱龙生¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了一种利用复合腔进行腔内和频的 589nm 激光器。激光器由两个子谐振腔组成。在两个子谐振腔中, 分别利用两个激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO₄ 晶体, 并分别选择 1319 nm 波长(对应 Nd:YAG 晶体的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁)与 1064 nm 波长(对应 Nd:YVO₄ 晶体的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 跃迁)振荡进行和频。通过谐振腔的优化设计, 实现了腔内两个波长较好的模式与增益匹配。在两个子腔的交叠部分, 利用 BiB₃O₆ (BIBO) 晶体 I 类临界相位匹配进行腔内和频, 得到和频激光输出。当 Nd:YAG 与 Nd:YVO₄ 晶体上抽运功率分别为 750 mW 和 600 mW 时, 获得了 24 mW, 589 nm 黄橙激光输出。该输出激光光束质量好、噪声低。

关键词 激光器; 激光二极管抽运; 和频; 复合腔; 589 nm 激光

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser Diode-Pumped Continuous-Wave 589 nm Laser with Doubly Resonant Intracavity Sum-Frequency Mixing

FU Xi-hong^{1,2}, TAN Hui-ming¹, LI Yi-min^{1,2}, HAO Er-juan^{1,2}, QIAN Long-sheng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A compact continuous wave (CW) 589 nm laser is reported by intracavity sum-frequency mixing in a composite cavity. The laser has two sub-cavities. Nd:YAG crystal and Nd:YVO₄ crystal were pumped by two laser diodes respectively in the two sub-cavities. In the two cavities wavelengths of 1319 nm from Nd:YAG (corresponding to the $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ transition) and 1064 nm from Nd:YVO₄ (corresponding to the $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ transition) were chosen to be mixed into 589 nm laser. Through designing of the cavity, the optimum matching of modes and gains for the two wavelengths was obtained. In the overlapping of the cavities, sum-frequency mixing was generated with a type I critical phase matching BiB₃O₆ (BIBO) crystal. A stable laser output of 24 mW at 589 nm with low noise was obtained at the incident pump power of 750 mW for the Nd:YAG crystal and 600 mW for the Nd:YVO₄ crystal.

Key words lasers; laser diode pump; sum-frequency mixing; composite cavity; 589 nm laser

1 引言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器以其体积小、寿命长、效率高、光束质量好和性能稳定等优点成为激光技术研究的热点。通过腔内倍频, 可获

得红、绿、蓝等可见波段激光输出, 并在许多领域得到了广泛应用。然而, 波长在 570~600 nm 之间的谱线由于缺少相应的基频光而无法通过倍频方式获得, 而这个波段在医疗、生物、显示等领域有着特殊用途。特别是其中的 589 nm 激光, 由于与钠 D_2 跃

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-02-07

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311140)资助项目。

作者简介: 付喜宏(1980—), 男, 陕西人, 博士研究生, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: fuxh_80@163.com

导师简介: 钱龙生(1950—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子器件技术方面的研究。

E-mail: cni863@public.cc.jl.cn

迁谱线相吻合,因而在实验室光谱研究、大气层遥感探测等领域有着重要应用。目前,应用中的该波段激光器主要是染料激光器,它们具有体积庞大、运转复杂、效率较低的缺点,因而,用全固态激光器实现 589 nm 激光输出便引起人们的关注。20 世纪 90 年代开始,一些研究组陆续报道了利用全固态激光器产生两条不同的激光谱线,之后进行和频来获得 589 nm 激光输出。这些报道主要集中在利用 Nd:YAG 晶体中两条发射截面较大的 1064 nm 与 1319 nm 谱线进行腔外和频^[1]、共振外腔和频^[2,3]或腔内和频^[4~6]来产生 589 nm 激光的连续及脉冲输出。2006 年, Jay W. Dawson 等报道了采用 938 nm 与 1583 nm 光纤激光器进行准相位匹配腔外和频得到了 3.5 W, 589 nm 激光输出^[7]。虽然光纤激光器具有良好的散热特性,可获得较好的输出光束质量,但 Jay W. Dawson 等所用的装置结构较为复杂、成本较高,在一定程度上会限制它的应用。以上各种方案中,与外腔或腔外和频相比,腔内和频能利用腔内较高的基频光功率密度来获得高的和频转换效率,因而在获得 589 nm 激光特别是连续波 589 nm 激光输出时引起了人们的关注。近期,吕彦飞等分别在线性腔及折叠腔中利用单块 Nd:YAG 晶体实现双波长振荡,通过腔内和频获得了 589 nm 激光输出,并取得了较好的实验结果^[8]。但这种方案中,双波长的竞争会影响到输出光束的质量,而且平衡两谱线之间的竞争也会对腔镜镀膜提出较高的要求。

本文报道了一种采用复合腔结构腔内和频实现 589 nm 激光输出的方法。利用这种结构,在两个子腔中,两个激光二极管分别抽运 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 晶体,分别产生 1319 nm 与 1064 nm 基频光振荡,在两个子腔的交叠区域,利用 BiB₃O₆ (BIBO) I 类临界相位匹配进行腔内和频。通过谐振腔的优化设计,实现了两基频光在腔内较好的模式与增益匹配,在抽运功率分别为 600 mW (对 Nd:YVO₄ 晶体) 与 750 mW (对 Nd:YAG 晶体) 时,获得了 24 mW, 589 nm 激光输出。采用本文所用结构,参与和频的两条谱线来自两个不同晶体,不会产生谱线竞争,所获得的 589 nm 激光稳定性好、噪声低,而且这种结构简单、紧凑,易于 589 nm 激光器的商业化。

2 谐振腔设计与分析

非线性和频 ($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$) 是一种三波相互作用的非线性光学过程。和频过程中要想获得高的和

频效率,参与和频的频率不同的两个基频光应遵循 1) 有较高的光功率密度; 2) 和频晶体中两光束有较好的时间与空间上的交叠; 3) 和频晶体中两基频光光子数密度尽可能达到 1:1。

对 589 nm 激光,有些报道中利用一块 Nd:YAG 晶体实现 1064 nm 和 1319 nm 双波长振荡,腔内加入非线性晶体进行和频的方法来获得 589 nm 激光输出^[7,9]。在这种结构中,虽可以利用腔内较高的基频光功率密度,但两条振荡谱线对反转粒子数的利用存在竞争,而且 Nd:YAG 中 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ 跃迁 (对应 1064 nm) 与 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ 跃迁 (对应 1319 nm) 的受激发射截面之比约为 5:1,平衡两谱线竞争实现双波长振荡对腔镜镀膜的要求较高,这也会提高激光器整体的阈值;另一方面,两基频光之间的竞争在一定程度上也会影响到和频光输出的稳定性与噪声。并且,在共用一个谐振腔的情况下,两个基频光束不容易实现较好的时间与空间上的交叠,而且腔内两基频光子数密度较难达到 1:1,从而会影响到和频转换效率。为此,我们采用复合腔^[10,11]的方法来克服上述缺点。

实验装置如图 1 所示,1319 nm 子腔由 Nd:YAG 晶体, M_1, M_2, M_3 组成,1064 nm 子腔由 Nd:YVO₄ 晶体, M_2, M_3 组成。两子腔通过平面合光镜 M_1 结合到一起,共用一部分谐振腔,在其中加入非线性晶体进行腔内和频。Nd:YAG ($\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 1.0%) 晶体,一端镀膜使其对 1319 nm 高反 ($R > 99.9\%$), 808 nm 增透 ($T > 95\%$), 作为 1319 nm 子腔的一个腔镜,另一端镀膜使其对 1319 nm 增透以减少 1319 nm 谱线的腔内损耗。Nd:YVO₄ ($3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 1.0%) 晶体左端镀膜使其对 1064 nm 高反 ($R > 99.9\%$), 808 nm 增透 ($T > 95\%$), 作为 1064 nm 子腔的一个腔镜,右端镀膜使其对 1064 nm

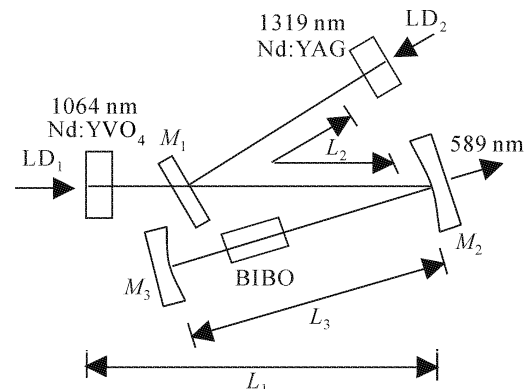


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

增透以减少1064 nm谱线在腔内的损耗。两个激光二极管最大输出功率均为2 W,中心波长为808 nm,激光二极管发出的光经耦合系统聚焦为半径约100 μm 的圆形光斑入射到晶体中。平面合光镜 M_1 为 $\phi 8$ mm的平面镜,右端镀15°入射p偏振1319 nm高反膜($R > 99.9\%$),p偏振1064 nm减反膜($T > 99\%$),左端面镀15°入射1064 nm减反膜($T > 99\%$)。曲率半径为50 mm的平凹镜 M_2 ,凹面对1319 nm/1064 nm高反($R > 99.9\%$),589 nm增透($T > 95\%$),平面对589 nm增透($T > 95\%$),作为折叠输出镜。折叠臂的另一端 M_3 为曲率半径为100 mm的平凹镜,凹面镀1064 nm/1319 nm/589 nm三色高反膜。折叠臂的折叠角尽量小($< 10^\circ$),以减小色散的影响。

在这种结构中,参与和频的两基频光分别在两个子腔中振荡,避免了两基频光对反转粒子数的竞争,不用对1064 nm谱线进行抑制。采用折叠腔结构,可在腔内产生三个束腰,分别放置激光晶体与和频晶体,从而可获得较高的抽运光的利用率及和频转换效率。同时,在折叠镜处基频光与和频光分离,从而也避免了晶体对和频光的吸收。

利用ABCD矩阵计算并考虑到模式匹配条件确定实验中各腔长: $L_1 = 37$ cm, $L_2 = 47$ cm, $L_3 = 32$ cm。此时,腔内振荡的1064 nm与1319 nm基频光在两晶体中的束腰分别为105 μm 与115 μm ,略大于抽运光斑半径,满足模式匹配条件^[12]。图2所示为利用ABCD矩阵计算的折叠臂中光线轨迹(以端镜 M_3 为起点),可见,通过腔参数的选择,在和频晶体(即束腰位置处)两基频光光束半径近似相等,实现了两基频光较好的交叠。

由于两块激光晶体分别由两个激光二极管抽运,通过分别调节两路激光二极管的电流可实现对

两基频光增益的单独调节,可使腔内光子数密度之比为1:1,达到增益匹配,因而可充分地利用两基频光,提高和频转换效率。

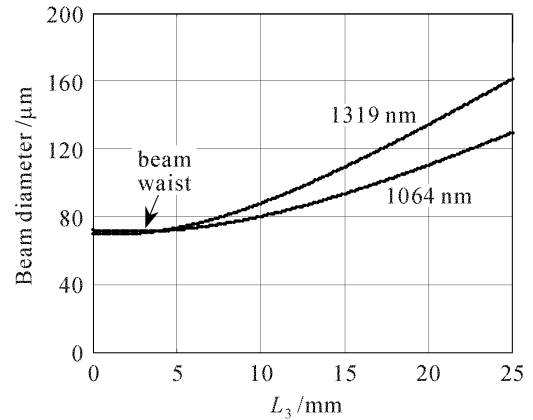


图2 折叠臂中的光线轨迹(以 M_3 镜为起点)

Fig. 2 Beam trace in the folded arm (from M_3)

3 实验结果及讨论

实验选用2 mm \times 2 mm \times 3 mm BiB₃O₆ (BIBO)作为和频晶体。BIBO晶体是一种新型的非线性光学晶体,物化性能稳定、光损伤阈值高,并且具有较大的非线性光学系数,可用作非线性频率变换,获得高效的倍频或和频输出^[13]。利用SNLO软件进行计算,BIBO晶体1064 nm+1319 nm \rightarrow 589 nm的和频参数列于表1。为了便于比较,表中也列出了常用的KTP及LBO晶体相应的和频参数。可以看出,LBO的走离角最小,接受角最宽,但较小的有效非线性系数限制了它的和频转换效率;KTP的有效非线性系数最大,但它的走离角也最大,不利于获得好的输出光斑质量;BIBO的有效非线性系数是LBO的2.7倍,走离角是KTP的1/3,因而可以在保证较好的光斑质量下获得较高的和频转换效率。

表1 BIBO,LBO和KTP在1064 nm和1319 nm和频时的参量

Table 1 Parameters of BIBO, LBO and KTP for sum-frequency mixing at 1064 nm and 1319 nm

Crystals	BIBO	LBO	KTP
Phase matching	1319(o)+1064(o)=588.9(e)	1319(o)+1064(o)=588.9(e)	1319(e)+1064(o)=588.9(o)
$(\theta, \varphi) / (^\circ)$	2.1, 0	90.0, 3.4	78.5, 0
$d_{\text{eff}} / (\text{pm/V})$	2.25	0.837	3.71
Walkoff angle /mrad	0, 0, 6.09	0, 0, 2.12	20.05, 0, 0
Angle tolerance / (mrad \cdot cm)	5.43	31.33	3.62

对非线性和频($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$),和频光功率

$$P_3 = \gamma_{\text{SFM}} P_1 P_2,$$

式中和频参量 γ_{SFM} 依赖于材料的非线性系数、参与

和频的基频光频率及腔内高斯光束的形式,对于一定的谐振腔结构 γ_{SFM} 是一定的^[14]。所以,当一个基频光功率 P_1 固定,而另一个基频光功率 P_2 改变,和

频光功率将随 P_2 线性变化。实验中, Nd:YVO₄ 晶体抽运功率恒定为 600 mW, 改变 Nd:YAG 晶体的抽运功率, 和频 589 nm 激光的输出功率如图 3 所示。可以看出, 输出曲线整体比较平缓, 接近线性。当 Nd:YAG 晶体的抽运功率增大到 750 mW 时, 589 nm 激光的输出功率为 24 mW。继续增大抽运功率, 589 nm 激光的输出功率不再有明显增加, 这是因为当 Nd:YAG 的抽运功率约为 750 mW 时, 和频过程使腔内 1064 nm 光子被充分利用, 所以随 Nd:YAG 抽运功率的增加输出功率会呈现饱和。若想进一步增加输出功率, 必须同时增大 Nd:YVO₄ 的抽运功率。

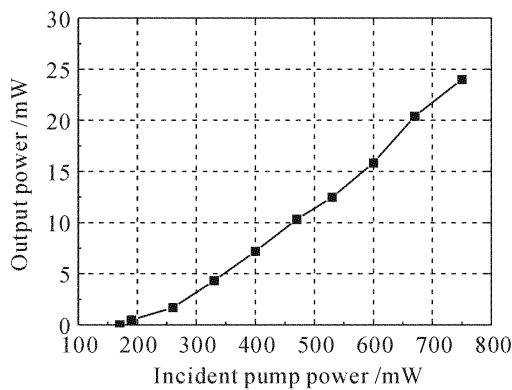


图 3 589 nm 输出功率随注入 Nd:YAG 抽运功率的变化

Fig. 3 Output power at 589 nm as a function of the incident pump power in Nd:YAG crystal

为研究激光输出噪声, 在和频输出功率最佳时, 将和频 589 nm 输出功率用快速硅光电二极管接收, 送入示波器 (LeCroy 9361C) 观察, 噪声情况如图 4 所示。经计算, 输出的均方根 (RMS) 值噪声为 0.9%。可见, 虽然未采用任何降低噪声的措施, 激光器仍为低噪声运转。这也是和频过程相对于倍频过程的一个显著特点。对腔内倍频, 当激光器运转于多纵模时, 由于各纵模和频产生及交叉饱和两种非线性过程的共同作用, 使得光能在各个纵模间不断转换, 导致谐波波动并产生噪声, 即“绿光问题”^[15]。对文中所用结构, 参与和频的两基频光来自两个不同的激光晶体, 且非线性晶体按和频的相位匹配方式切割, 不会有各自的倍频光产生, 和频过程中存在的非线性过程只有同一频率不同纵模间增益饱和及不同频率纵模间交叉和频, 因而纵模间相互耦合及交叉饱和作用被大大减弱, 和频过程输出的噪声要远小于倍频过程。

图 5 为用光束轮廓仪 (Model 2350, Photon Inc.) 及数码相机拍到的 589 nm 激光光斑图。激光

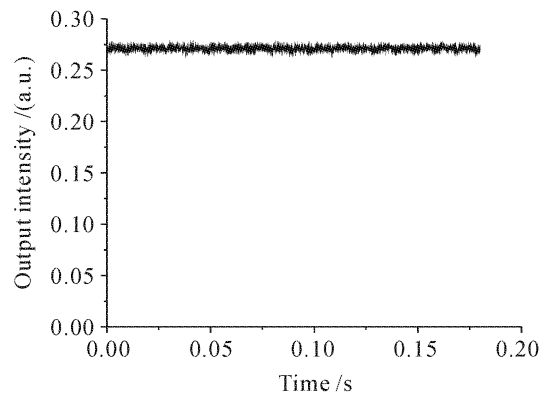


图 4 589 nm 输出的噪声情况

Fig. 4 Noise characteristic of the output at 589 nm

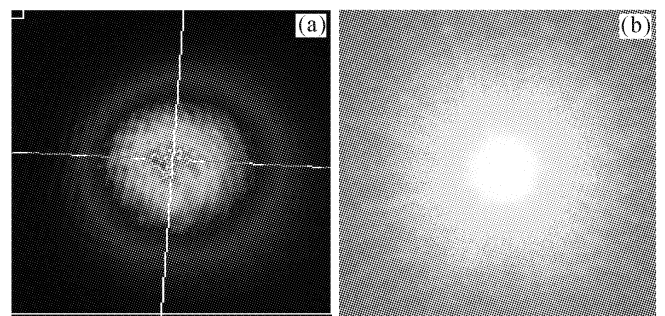


图 5 589 nm 输出的光斑

Fig. 5 Beam spot of the output at 589 nm

输出模式为 TEM₀₀, 光束椭圆率为 0.97。

4 结 论

利用复合腔结构进行腔内和频实现了 589 nm 激光输出。当抽运功率为 600 mW (对 Nd:YVO₄ 晶体) 及 750 mW (对 Nd:YAG 晶体) 时, 获得了 24 mW, 589 nm 激光输出。激光输出光束质量好、噪声低。实验中如果进一步减小腔长以提高腔内基频光功率密度或采用有效非线性系数比较大的周期性极化晶体进行准相位匹配和频, 转换效率会进一步提高。而且, 如果增加激光二极管的抽运功率, 通过优化谐振腔结构及整体的散热, 也可进一步提高 589 nm 激光的输出功率。结果表明, 采取复合腔结构和和频是有效获得 589 nm 激光输出的实用方法。同时, 采用复合腔结构可以利用不同晶体的不同谱线进行和频, 这会大大扩展固体激光器输出的波长范围, 因而具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Thomas H. Jeys, A. A. Brailove, Aram Mooradian. Sum frequency generation of sodium resonance radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(13):2588~2591
- 2 Joshua C. Bienfang, Craig A. Denman, Brent W. Grime *et*

- al.. 20 W of continuous-wave sodium D_2 resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22):2219~2221
- 3 Joseph D. Vance, Chiao-Yao She, Hans Moosmüller. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400-mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21):4891~4896
- 4 M. B. Danailov, P. Apai. 589 nm light generation by intracavity mixing in a Nd:YAG laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(12):8240~8242
- 5 Bi Yong, Sun Zhipei, Zhang Ying *et al.*. All-solid-state 589 nm Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):440
毕勇, 孙志培, 张瑛等. 全固态和频 589 nm Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):440
- 6 Bo Yong, Geng Aicong, Lu Yuanfu *et al.*. A 4.8-W $M^2 = 4.6$ continuous-wave intracavity sum-frequency diode-pumped solid-state yellow laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(6):1494~1497
- 7 Jay W. Dawson, Alex D. Drobshoff, Raymond J. Beach *et al.*. Multi-watt 589 nm fiber laser source [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61021F-1~61021F-9
- 8 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):438~442
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):438~442
- 9 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1279~1280
何兵, 楼祺洪, 周军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 10 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency laser at 589 nm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3):260~264
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3):260~264
- 11 Yanfei Lü, Huiming Tan, Longsheng Qian. All-solid-state doubly resonant sum-frequency continuous-wave laser at 555 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1):25~26
- 12 Paolo Laporta, Marcello Brusaard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10):2319~2326
- 13 Chenlin Du, Shuangchen Ruan, Yongqin Yu. High-power intracavity second-harmonic generation of 1.34 μm in BiB_3O_6 crystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21):8591~8595
- 14 W. P. Risk, T. R. Gosnell, A. V. Nurmikko. Compact Blue-Green Lasers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 15 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9):1175~1180