

基于镀金膜反射式衍射光栅的激光光谱合成

陈颖¹, 杨依枫², 郑也², 陈晓龙², 刘恺², 何兵^{2*}, 吴庆彪¹

¹上海建桥学院机电学院, 上海 201306;

²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

摘要 为基于反射式衍射光栅实现多波长光束阵列光谱合成, 采用自研的镀金膜反射式衍射光栅作为色散元件, 对两束波长分别为 1064 nm 和 1080 nm 的单模光纤激光束进行光谱合成, 探索了合成系统的光学结构和光束质量等方面的优化措施, 实现了合成功率率为 13.64 W、合成效率为 91.9% 及合成光束质量为 1.53 的高亮度输出, 并对色散面内的光束质量退化及其影响因素进行了评估。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 光谱合成; 衍射光栅; 光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0906004

Spectral Combining of Laser Based on Reflective Diffraction Grating Coated with Gold Film

Chen Ying¹, Yang Yifeng², Zheng Ye², Chen Xiaolong², Liu Kai², He Bing², Wu Qingbiao¹

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China;

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To achieve spectral combining of multiple-wavelength beam array based on reflective diffraction grating, a home-made reflective diffraction grating coated with gold film is used as a dispersion element to achieve spectral combining of two single-mode laser beams with wavelength of 1064 nm and 1080 nm. The structure of the combination system and the optimization method for the beam quality are studied. The combined power of 13.64 W, combined efficiency of 91.9% and combined beam quality of 1.53 are achieved. The beam quality degradation and its influence factors in dispersion plane are estimated.

Key words fiber optics; fiber laser; spectral combining; diffraction grating; beam quality

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.3298; 050.1950

1 引言

与传统固态激光器相比, 光纤激光器具有转换效率高、亮度高、热控方便以及结构紧凑等优点, 在工业、材料、医学、国防等诸多领域具有重要应用^[1-3]。然而, 光纤波导材料的固有缺陷导致的非线性效应、光纤端面损伤、热致损伤以及模式不稳定性等问题严重制约了光纤激光器的输出亮度^[4-6]。利用多束光纤激光实现空域重叠的合成技术, 该技术克服了单模光纤激光器的瓶颈问题, 实现了激光亮度的倍增, 逐渐成为激光技术领域的研究热点。许多国外主流研究机构对此进行了广泛研究^[7-11]。光谱合成是一种光纤激光合成技术, 其物理本质是色散的逆过程, 即利用色散元件将不同角度入射的多波长光束以相同的角度共孔径输出。光谱合成无需复

收稿日期: 2017-02-06; 收到修改稿日期: 2017-05-08

基金项目: 上海高校青年教师培养资助(ZZjq14014)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)

作者简介: 陈颖(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光方面的研究。E-mail: 12069@gench.edu.cn

导师简介: 吴庆彪(1948—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子、电力传动理论与系统等方面的研究。

E-mail: 08045@gench.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: bryanho@siom.ac.cn

杂的相位控制机制,与相干合成、直接功率合成等技术相比,具有亮度高和结构简单、稳定的优点^[12-14]。

光谱合成技术常用的色散元件包括色散棱镜、双色片、体布拉格光栅和反射式衍射光栅等。色散棱镜的色散能力较弱,规模扩展性差;双色片的镀膜带宽及边缘光谱特性不佳;基于体布拉格光栅的光致热敏折射率玻璃材料对激光能量的吸收使得谐振波长漂移且效率下降,同时透射式光学元件易引入波前畸变^[15-16];反射式衍射光栅在热控和光束质量优化方面具有突出优势,已成为目前重点发展的光谱合成采用的色散元件^[17-19]。反射式衍射光栅分为多层电介质镀膜和金属镀膜两种,多层电介质膜反射式衍射光栅可承受较高的功率,更易达到高功率输出,因此获得了国内外诸多研究人员的广泛关注。2011年,Wirth等^[20]采用4路光束阵列和线密度为 $960\text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的偏振非相关多层电介质膜反射式衍射光栅实现了 8.2 kW 的光谱合成。2016年,Honea等^[21]采用96路激光阵列,基于线密度为 $960\text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的偏振非相关多层电介质膜反射式衍射光栅实现了总功率为 30 kW 的光谱合成。虽然金属膜反射式衍射光栅的功率承受性相对较低,但是其支持的带宽可覆盖紫外波段至远红外波段,有望在冷原子物理、中红外激光雷达和特殊材料加工等领域得到广泛应用。此外,金属光栅具有技术成熟、制作方便及线密度设计灵活等优点。金属光栅光谱合成的研究工作开展较早,早期采用其进行光谱合成的实验主要基于外腔结构。1999年,Cook和Fan^[22]采用一块线密度为 $1200\text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的金属光栅,通过外腔实现了 1087 nm 和 1120 nm 两束光纤激光的合成,并通过调节光纤端面在透镜焦平面的位置获得了 50 nm 的波长调谐,证明了大规模合成的可行性。2000年,Daneu等^[23]实现了11路二极管巴条阵列的光谱合成,获得了20倍衍射极限的输出。2003年,Augst等^[24]对阵列规模进行了扩展,实现了5束光纤激光(总功率为 6 W)的光谱合成,合成光束质量 $M^2=1.14$ 。近年来,基于主振荡功率放大(MOPA)结构的窄线宽光纤放大器逐渐成为光谱合成的主流光源,采用反射镜阵列进行阵光束拼接并实现近 Littrow 角入射的方法更具灵活性,使金属膜反射式衍射光栅体现出更大的应用价值。

利用自研镀金膜的反射式衍射光栅和波长为 1064 nm 和 1080 nm 、光谱带宽为 0.04 nm 的单模光纤放大器,基于折返镜组搭建了近 Littrow 角入射的双光束光谱合成系统,实现了功率为 13.64 W 的功率输出,合成效率达 91.9% , $M^2=1.53$,并在理论与实验方面对光束质量退化情况进行了分析,最后对其发展前景进行了展望。

2 基本原理

反射式衍射光栅光谱合成的技术原理为色散的逆过程,不同波长的光束分别以不同角度入射至光栅同一点,并以完全相同的衍射角出射,从而形成共孔径的光束输出。基于反射式衍射光栅的光谱合成原理图如图1所示。光栅采用石英玻璃基底,表面抛光后镀高反射(HR)金属膜,顶层被曝光、刻蚀后形成的微结构可使该光栅工作在特定衍射级。

衍射光与入射光位于光栅法线同侧,则光栅方程为

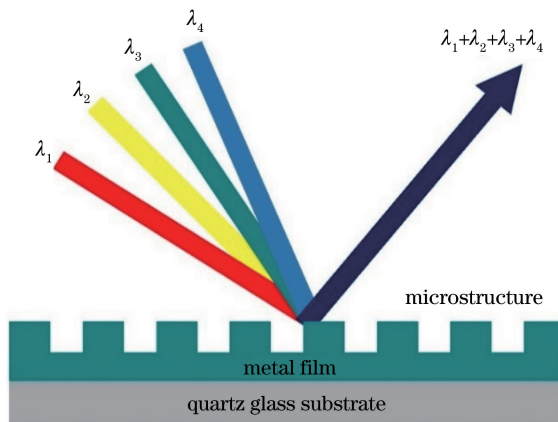


图1 基于反射式衍射光栅的光谱合成原理图

Fig. 1 Schematic of spectral combining based on reflective diffraction grating

$$d(\sin \theta + \sin \varphi) = m\lambda, \quad (1)$$

式中 θ 和 φ 分别为特定波长光束的入射角和衍射角, d 为光栅常数, m 为衍射级, λ 为入射光波长。一般情况下, 光栅设定工作在 -1 衍射级, 即 $|m| = 1$ 。对(1)式等号两边分别求导, 可得

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (2)$$

当 $\theta = \varphi$ 时, 满足 Littrow 衍射条件, 此时有

$$2d \sin \theta_{\text{Littrow}} = m\lambda, \quad (3)$$

式中 θ_{Littrow} 为 Littrow 角。特定波长对应的特定 Littrow 角为

$$\theta_{\text{Littrow}} = \arcsin(10^{-6} N\lambda/2), \quad (4)$$

式中 N 为光栅线密度。根据反射式衍射光栅光谱合成的理论基础, 不同波长的入射光在其对应的 Littrow 角附近入射, 就有可能使入射光阵列合成为同一光束。

3 实验装置与结果分析

采用的光栅为具有偏振相关特性的镀金膜反射式衍射光栅, 基底为石英玻璃, 线密度为 $1780 \text{ line} \cdot \text{mm}^{-1}$, 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。两束激光采用全光纤 MOPA 结构, 中心波长分别为 1064 nm 和 1080 nm , 光谱半峰全宽(FWHM)为 0.04 nm , 1064 nm 与 1080 nm 波长全光纤 MOPA 结构如图 2 所示。单偏振种子光(MO)功率为 40 mW , 第一级放大采用保偏 $(2+1) \times 1$ 合束器将功率为 10 W 、波长为 976 nm 的波长锁定半导体激光器(LD)发出的激光与种子光共同耦合至保偏增益光纤(型号为 PLMA-YDF-10/130, Nufern 公司, 美国)中, 抽运滤除器用于吸收残余抽运光, 以保证光束质量。保偏隔离器(ISO)的隔离度为 25 dB , 可保证前级不受主放级返回光的影响。 $1:99$ 保偏光纤分束器用于信号光采样, 分别在 P1 端和 P2 端进行后向和前向功率与光谱监测。第二级放大采用保偏 $(2+1) \times 1$ 合束器将第一级放大的输出激光与功率为 25 W 的波长锁定 LD 发出的激光耦合至保偏增益光纤, 光纤参数与第一级相同, 后接抽运滤除器滤除残余抽运光, 准直器的焦距为 14 mm , 将数值孔径为 0.075 的发散光准直为光束直径约为 2 mm 的光束后输出。

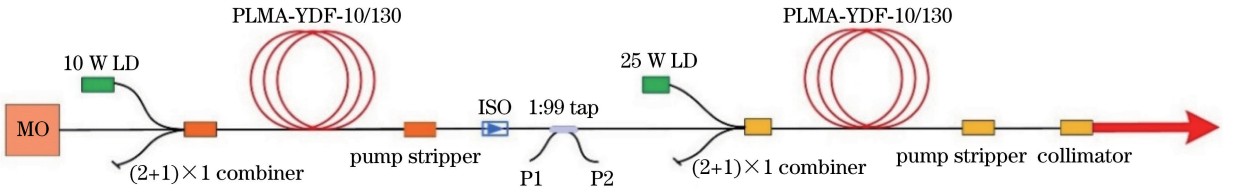


图 2 1064 nm 与 1080 nm 波长全光纤 MOPA 结构

Fig. 2 Structure of all-fiber MOPA with wavelengths of 1064 nm and 1080 nm

为保证在线偏振光栅的衍射效率, 两束激光的偏振消光比需不小于 20 dB , 并且偏振方向需与光栅刻线方向平行, 两束输出光分别通过偏振分束棱镜(PBS)起偏, 再利用半波片($\lambda/2$)旋转偏振方向使其与栅线平行, 从而使 -1 级衍射效率达到最高。当 $N = 1780 \text{ line} \cdot \text{mm}^{-1}$, 1064 nm 波长光束的 Littrow 角为 71.26° , 1080 nm 波长光束的 Littrow 角为 73.99° , 两个 Littrow 角的夹角约为 2.73° 。本实验中两束光经折返镜组(HR at $1060 \sim 1090 \text{ nm}$)调整入射角度, 以近 Littrow 角入射。由于折返镜组的口径较小, 两束光入射至光栅上同一点的实际夹角为 4.96° , 当合成光通过另一块反射镜反射至光束质量分析仪后进行 M^2 测量。双光束光谱合成的光学系统示意图如图 3 所示。

两束光的总合成功率及合成效率与两个激光光源总功率的关系如图 4 所示。随着两束光输出功率的提高, 衍射效率在 $82\% \sim 91.9\%$ 之间振荡并且呈现增加的趋势, 总入射功率为 14.84 W 时的合成功率为 13.64 W , 衍射效率达到最高值 91.9% 。

合成总功率为 13.64 W 时, 采用光谱仪(型号 YOKOGAWA 6370B, YOKOGAWA 公司, 日本)测得的合成光谱如图 5 所示, 两束光的光谱信噪比约为 40 dB 。

合成光的光束质量是衡量光谱合成效果的重要评价标准。这里分别对两束子光束和合成光束进行评估, 分析合成光束的光束质量退化情况。 M^2 因子测试设备选用德国 PRIMES 公司的高功率光束质量监测

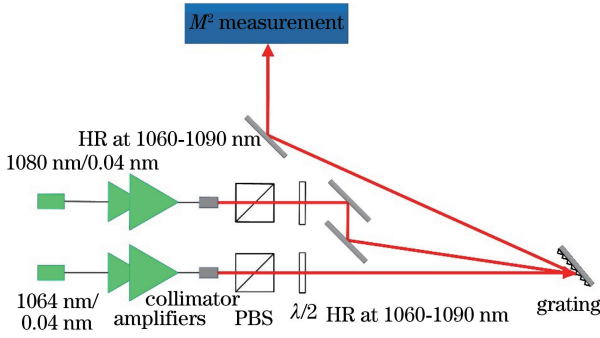


图 3 双光束光谱合成光学系统示意图

Fig. 3 Schematic of optical system for double-beam spectral combining

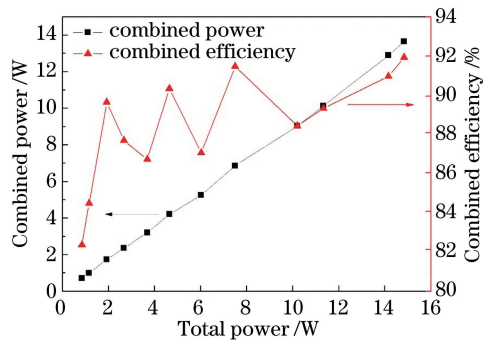


图 4 合成功率、合成效率与两个激光光源总功率的关系

Fig. 4 Relationship among combined power, combined efficiency and total power of two laser sources

仪, 搭配测试软件(Laser Diagnostic Software 2.9)进行光束质量评估。1064 nm 激光束和1080 nm激光束的输出功率均为 7.4 W 时, M^2 分别为 1.26 和 1.45; 合成功率率为 13.64 W 时, $M^2 = 1.53$ 。子光束与合成光束的形貌及光束质量测试结果如图 6 所示。

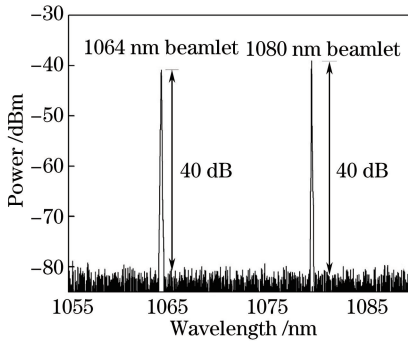


图 5 总功率为 13.64 W 时的合成光谱

Fig. 5 Combined spectrum when total power is 13.64 W

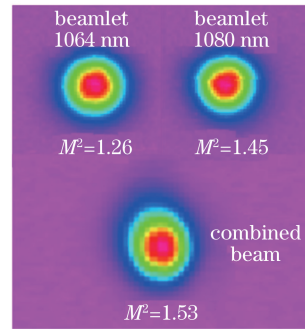


图 6 子光束阵列、合成光的形貌及光束质量测量结果

Fig. 6 Measurement results of beam profile and beam quality of sub-beam array and combined beam

合成光束的光束质量退化情况如表 1 所示。

表 1 合成光束的光束质量退化情况

Table 1 Beam quality degradation of combined beam

Parameter	M^2 of combined beam	1064 nm beamlet	1080 nm beamlet	Average M^2 of beamlets	Measured M^2 degradation	Calculated M^2 degradation
M_x^2	1.747	1.199	1.153	1.176	0.571	0.320
M_y^2	1.287	1.319	1.711	1.515	-0.228	0
M^2	1.530	1.260	1.450	—	—	—

根据(1)式与 M^2 的定义, 可以得到 M^2 的退化公式为 $\Delta M_x^2 = \omega \pi \Delta \lambda / (2 \lambda \Lambda \cos \theta_{\text{Littrow}})$, 其中 $\omega = 1 \text{ mm}$ 为束腰半径, $\Delta \lambda = 0.04 \text{ nm}$ 为单台激光器的光谱宽度, $\Lambda \approx 562 \text{ nm}$ 为光栅常数, 得到 $\Delta M_x^2 \approx 0.32$, $\Delta M_y^2 = 0$ 。实验中实测色散平面内(x 方向)光束质量发生退化, 垂直散射平面内(y 方向)光束质量没有发生退化, 这是由于子光束的有限光谱带宽在色散面内产生色散造成的。实际退化值(0.571)为理论值(0.32)的 1.78 倍, 这是由于两束光的光谱呈双峰正割型, 在 0.04 nm 的 FWHM 外还存在较多的光谱分量, 这部分分量的发散角较大, 因此实际测试中色散面内的光束质量要稍大于理论值。通过改善光纤放大器种子的光谱特性, 并控制放大器的光谱不失真, 有望实现更准确的光束质量测量。

4 结 论

基于反射式衍射光栅的光纤激光光谱合成技术, 通过逆色散过程实现功率倍增和光束质量保持, 可以有

效弥补单模光纤激光输出亮度受限的缺陷,是获得高亮度激光的重要技术途径。自主研发了镀金膜的反射式衍射光栅,基于全光纤 MOPA 结构搭建了 1064 nm 和 1080 nm 两台光纤放大器,设计了一套近 Littrow 角入射的光谱合成光学系统,实现了总功率为 13.64 W 的光谱合成,合成效率达 91.9%。研究了合成效率在合成功率提升过程中的变化趋势,同时研究了合成光束质量的退化情况,在子光束 $M^2=1.26$ 和 $M^2=1.45$ 的情况下,最终得到合成光的 $M^2=1.53$ 。子光束 0.04 nm 的有限带宽使得合成光束在色散面内发生了 0.571 的光束质量退化。

不同于带宽只有数十纳米的常规多层电介质膜反射式衍射光栅,采用基于镀金膜的反射式衍射光栅在 500 nm~10 μm 波长范围都接近全反射,在可见光彩色成像、中红外激光雷达和远红外加工等领域具有很大的发展潜力。银元素在大于 300 nm 的波长范围内的反射率较高,铝元素的反射谱甚至可以拓宽至少 200 nm 的波长范围。镀银或铝金属膜的反射式衍射光栅可实现紫外光光谱合成,有望在冷原子物理等领域获得重要应用。

参 考 文 献

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, *et al.* The renaissance and bright future of fibre lasers[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.
- [2] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [3] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, *et al.* The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [4] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [5] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [6] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [7] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, *et al.* Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [8] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.* Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [9] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, *et al.* Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [10] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [11] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, *et al.* Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [12] Yan H, Ma Y, Sun Y H, *et al.* Scalable hybrid beam combining of kilowatt fiber amplifiers into a 5-kW beam [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 95-99.
- [13] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjiang, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0901009.
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901009.
- [14] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [15] Ott D, Divliansky I, Anderson B, *et al.* Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29620-29627.
- [16] Drachenberg D R, Andrusyak O, Venus G, *et al.* Thermal tuning of volume Bragg gratings for spectral beam combining of high-power fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1242-1246.
- [17] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1178-1183.

- [18] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, *et al.* Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 337-343.
- [19] Schmidt O, Andersen T V, Limpert J, *et al.* 187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 226-228.
- [20] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [21] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]. SPIE, 2016, 9730: 97300Y.
- [22] Cook C C, Fan T Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity[C]. Advanced Solid State Lasers, 1999: PD5.
- [23] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, *et al.* Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 405-407.
- [24] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 331-333.