

# 基于石墨烯被动调 Q Nd:YAG 晶体微片激光器

曹 懿 刘 佳 刘 江 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 设计了以石墨烯作为可饱和吸收体的被动调 Q 掺钕钇铝石榴石晶体(Nd:YAG)微片激光器。该激光器采用三明治结构,附有石墨烯薄层的 YAG 晶体紧密压贴于工作物质 Nd:YAG 晶体上,晶体端面镀膜作为端面镜构成平行平面谐振腔。采用光纤耦合输出激光二极管端面抽运技术,利用石墨烯的可饱和吸收作用,在注入功率为 1.17 W 时实现微片激光器的调 Q 运转,获得波长 1064.6 nm,重复频率 300~807 kHz 可调,最小脉冲宽度 75 ns 的激光输出。激光器最大输出功率 38.4 mW,最大单脉冲能量 54.7 nJ。

**关键词** 激光器;微片激光器;石墨烯;可饱和吸收体;被动调 Q

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202009

## Passively Q-Switched Nd:YAG Microchip Laser Based on Graphene

Cao Yi Liu Jia Liu Jiang Wang Pu

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A design passively Q-switched Nd:YAG microchip laser based on graphene saturable absorber is presented. A thin layer of graphene is sandwiched between the Nd:YAG crystal and YAG crystal closely, and dichroic coatings on crystals is used as reflective mirrors for the plane parallel resonator. The Nd:YAG crystal is end pumped by a fiber-coupled laser diode via a lens imaging system. Employing graphene as saturable absorber, Q-switched Nd:YAG microchip laser is realized at the pump power threshold of 1.17 W with laser central wavelength of 1064.6 nm. The minimum pulse duration is 75 ns at 488 kHz and the repetition rate is tunable from 300 to 807 kHz with the increase of the pump power. The maximum output power and highest pulse energy of the laser measured are 38.4 mW and 54.7 nJ, respectively.

**Key words** lasers; microchip lasers; graphene; saturable absorber; passively Q-switched

**OCIS codes** 140.3480; 140.3530; 140.3540; 160.4330

## 1 引 言

石墨烯是由碳原子按照六角蜂窝状结构紧密排列而成的二维单层石墨,可构成零维富勒烯、二维碳纳米管、三维石墨等其他碳质结构<sup>[1]</sup>。作为一种新型材料,石墨烯及其衍生物有着优异的电学、光学和力学特性,在高性能电子器件、传感探测、信息存储、复合材料等领域具有重要的潜在应用价值。特别是原子层级的石墨烯材料能够实现从可见光到中红外波段的可饱和吸收<sup>[2,3]</sup>,使其在激光器制造与应用

方面有着重要意义。

近年来,被动调 Q 微片激光器以其体积小、结构简单紧凑、全固化易维护的特点在科学研究、工业加工、生物医学、军事探测等领域获得了广泛应用。目前激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 微片激光器已可实现脉宽皮秒至纳秒量级、重复频率千赫兹量级、峰值功率千瓦量级的脉冲输出<sup>[4]</sup>。通常,被动调 Q 微片激光器多使用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 等晶体作为可饱和吸收体,也有使用半导体可饱和吸收镜

收稿日期: 2011-09-27; 收到修改稿日期: 2011-11-14

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

作者简介: 曹 懿(1986—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: sdybcao@163.com

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

(SESAM)<sup>[5,6]</sup>。前者对晶体的掺杂工艺要求严格,而且损伤阈值也不理想;后者对腔长增加极小并能承受较高功率,但是 SESAM 本身生产工艺甚为复杂,价格十分昂贵。

目前,使用化学气相沉积法(CVD)<sup>[7]</sup>、化学分离法<sup>[8]</sup>和 SiC 外延生长法<sup>[9]</sup>等手段皆可获得单层石墨烯。其中 CVD 法具有产物量高、生长面积大等优点,逐渐成为大规模生产石墨烯材料的重要方法。利用氧化石墨还原法制备的石墨烯作可饱和吸收体应用于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器,分别实现了单脉冲能量 8.4 nJ、最小脉宽 16 ps 的被动锁模<sup>[10]</sup>和最大单脉冲能量 3.2 μJ、最小脉宽 150 ns 的被动调 Q<sup>[11]</sup>。采用 SiC 外延生长法制备的石墨烯作可饱和吸收体,实现了单脉冲能量 680 nJ、重复频率 850 kHz 的被动调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[12]</sup>,单脉冲能量 159.2 nJ 的被动调 Q 的 Nd:YAG 激光器<sup>[13]</sup>和最小脉宽 56.2 ns、重复频率 795 kHz 被动调 Q 的 Nd:LuVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[14]</sup>。使用 CVD 法制备的铜基石墨烯作可饱和吸收体,实现了最小脉宽 260 fs 的被动锁模 Er:Yb:glass 激光器<sup>[15]</sup>。本课题组利用不同方法制备的石墨烯材料对光纤激光器被动脉冲调制进行相关研究,使用 6H-SiC 衬底外延石墨烯作可饱和吸收体实现了环形腔结构的全正色散掺镜光纤激光器的被动锁模,其最大平均输出功率为 20 mW,相应的最高单脉冲能量为 19 nJ,激光脉冲宽度约为 520 ps<sup>[16]</sup>。此外采用线形腔结构,实现了石墨烯被动调 Q 掺镜光纤激光器脉冲输出,其重复频率在 140~257 kHz 可调,最窄激光脉冲宽度为 70 ns,最大平均功率为 12 mW,相应最大单脉冲能量为 46 nJ<sup>[17]</sup>。

石墨烯作可饱和吸收体,其良好的导热性与光电开关特性十分有利于激光器调 Q 运转。其原子级别的材料厚度对腔长几乎没有影响,完全满足微片激光器的全固化要求。Nd:YAG 晶体作激光工作物质,属于四能级系统,器件阈值低,同时由于其具备非常优良的热学性质,适用于制造连续和高重复频率激光器。采用廉价的石墨烯材料作为可饱和吸收体,通过合理优化 Nd:YAG 微片激光器的工作参数,可望在达到优质激光脉冲输出的同时,有效减小激光器光学体积,从而降低被动调 Q 微片激光器的工艺难度和生产成本。本课题组利用镍基生长石墨烯作为可饱和吸收体对 Nd:YAG 微片激光器的被动调 Q 进行了研究。

## 2 实验装置

石墨烯被动调 Q 微片激光器构造如图 1 所示。附着石墨烯薄层的 YAG 晶片紧密压贴于的 Nd:YAG 晶体表面,形如三明治结构,两者外形尺寸皆为 3 mm×3 mm×1 mm,并嵌于铜热沉中自然冷却。Nd:YAG 晶体掺杂原子分数为 5%,抽运端面(S<sub>1</sub>)镀 808 nm 高透膜与 1064 nm 高反膜,该面同时作为谐振腔的全反镜;其另一端面(S<sub>2</sub>)镀 1064 nm 增透膜。YAG 晶片紧贴 Nd:YAG 晶体一侧的端面(S<sub>3</sub>)镀 1064 nm 部分反射膜,R=99.5%(与 Nd:YAG 晶体抽运端面构成长度 1 mm 的激光谐振腔);其另一端面(S<sub>4</sub>)镀 1064 nm 增透膜。抽运源为光纤耦合输出激光二极管,激光中心波长(λ)805 nm,最高输出功率 1.994 W。准直系统主要由两个焦距为 8 mm 凸透镜构成,抽运光束经其聚焦耦合进入 Nd:YAG 晶体进行端面抽运。

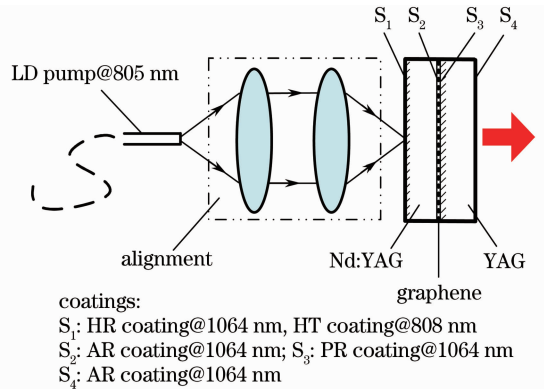


图 1 石墨烯被动调 Q 的 Nd:YAG 微片激光器实验装置  
Fig. 1 Schematic setup of the graphene Q-switched Nd:YAG microchip laser

实验所用石墨烯是利用 CH<sub>4</sub> 作为碳源、H<sub>2</sub> 作为载气,在高温真空状态下,于镍膜基底表面生长得到的。使用光学胶粘附剥离的方法,将石墨烯薄层转移至 YAG 晶体端面(S<sub>3</sub>)。石墨烯拉曼光谱如

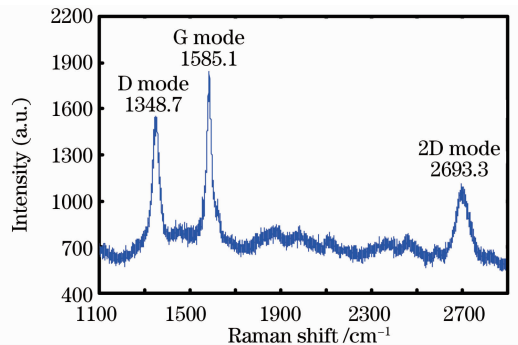


图 2 石墨烯拉曼光谱

Fig. 2 Raman spectrum of the graphene

图 2 所示,其 D 峰、G 峰与 2D 峰分别位于 1348.7、1585.1、2693.3  $\text{cm}^{-1}$  处。由图可见,实验所用石墨烯的 D 峰强度较高,表明其微观尺寸比较小;其 2D 峰宽度相对较宽(约 64  $\text{cm}^{-1}$ ),大于单层石墨烯的相应宽度。单层石墨烯的吸收率约为 2.3%,考虑到光学胶本身也有一定的透射率,经测算,本次实验所用石墨烯材料厚度在 8 层左右。

### 3 实验结果与分析

在无石墨烯夹层情况下,实现了 Nd:YAG 微片激光器的稳定连续运转,出光阈值 62 mW,当抽运功率 1.99 W 时得到最大输出功率 265 mW 的连续激光,斜率效率与光光转换效率分别为 13.7% 和 13.3%。可见在抽运源的中心波长( $\lambda$ )在 805 nm 附近(偏离 Nd:YAG 的 808 nm 吸收峰),Nd:YAG 晶体的增益足够强,保证了较低的阈值,可以满足使用石墨烯作可饱和吸收体的基本要求。此后,将镍膜基底石墨烯薄层转移到 YAG 晶片上,精细调节耦合光路与谐振腔参数,在抽运功率 1.17 W 时实现激光器的调 Q 运转,此时脉冲重复频率 300 kHz,平均输出功率 10.5 mW。如图 3 所示,微片激光器在调 Q 工作状态下,平均输出功率随着抽运功率提高近似呈线性增加趋势,激光重复频率从 300 kHz 增加到 807 kHz,在抽运功率 1.84 W 时获得最大输出功率 38.4 mW 的脉冲激光,激光器斜率效率与光-光转换效率分别为 4.3% 和 2.1%。插图为输出功率 12 mW 时所测光斑能量分布。

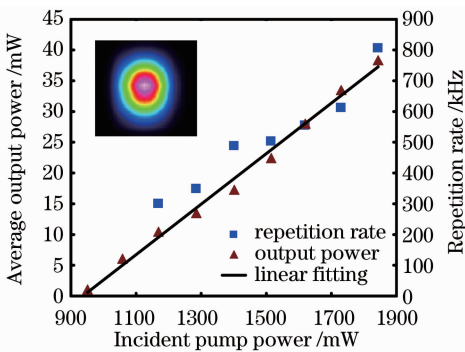


图 3 重复频率和输出功率与抽运功率的关系曲线  
插图为输出功率 12 mW 时的光斑能量分布

Fig. 3 Output power corresponding to the incident pump power. Inset is energy distribution of the laser spot at the output power of 12 mW

图 4 为石墨烯被动调 Q 微片激光器的输出光谱,使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪,测得光谱中心波长为 1064.6 nm,半峰全宽(FWHM)为 0.078 nm。

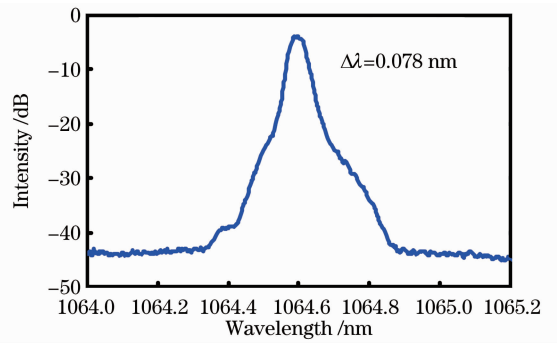


图 4 石墨烯被动调 Q 微片激光器的输出光谱  
Fig. 4 Optical spectrum of passively Q-switched microchip laser based on graphene

如图 5 所示,激光器调 Q 运转时输出纳秒级脉冲,石墨烯工作在快饱和吸收状态。随着抽运功率的提高,石墨烯可饱和吸收体的调制深度变大,脉冲宽度也相应减小。当重复频率增加到 488 kHz 附近时,脉冲间隔将不足以使上能态的反转粒子数达到最大值,此时腔内增益会减小,造成脉冲宽度增加,同时注意到注入功率的进一步提高使得石墨烯可饱和吸收体的调制深度继续增大,使其对脉宽增加有一定的抑制作用。图 6 为使用 1 GHz 示波器和

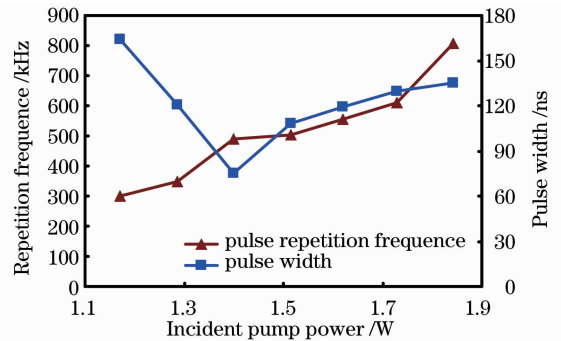


图 5 脉冲宽度和重复频率与抽运功率的对应关系  
Fig. 5 Pulse width and repetition rate corresponding to the incident pump power

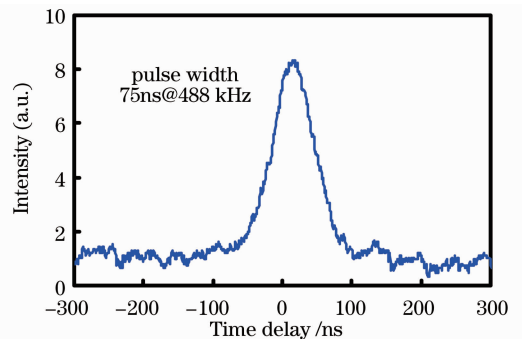


图 6 石墨烯被动调 Q 微片激光器的最窄脉宽  
Fig. 6 Minimum pulse width of the passively Q-switched microchip laser based on graphene

200 MHz 探头测量,在重复频率 488 kHz 时获得 75 ns 的最小脉冲宽度,此时抽运功率为 1.4 W。

图 7 为激光器调 Q 运转时,单脉冲能量输出功率与抽运功率的对应关系。由图可见,由于重复频率 488 kHz 附近腔内增益减小,使得抽运功率 1400 mW 处(此时重复频率 488 kHz)单脉冲能量较之前有所下降。但是由于石墨烯可饱和吸收体的调制深度随抽运功率的提高而持续增大,激光单脉冲能量基本呈上升趋势,最大单脉冲能量约为 55 nJ。考虑到微片激光器谐振腔短,腔长相对变化量受热效应等因素影响非常大,测得单脉冲能量最大值不在最大输出功率处。

微片激光器调 Q 运转时,由于热效应和标准具作用<sup>[18]</sup>,随着输出功率的提高,脉冲幅度和脉冲间隔的抖动越来越明显。如图 8 所示,图(a)为输出功率 17.3 mW 时刻脉冲串形态,此时脉宽 75 ns、重复频率 488 kHz,图(b)为最大输出功率 38.4 mW

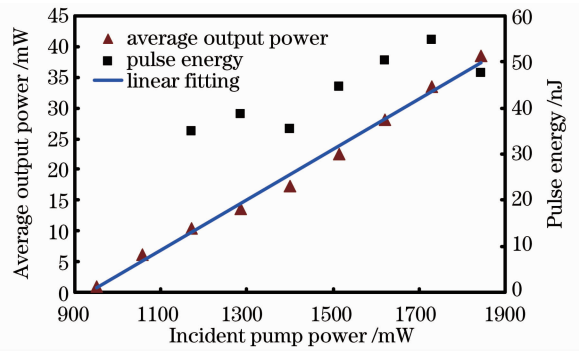


图 7 单脉冲能量和输出功率与抽运功率的对应关系  
Fig. 7 Pulse energy and output power corresponding to the incident pump power

时刻脉冲串形状,已趋于不稳定,此时脉宽 103 ns、重复频率 807 kHz。若使用均一性更好的单层石墨烯材料,采用具备更高抽运光吸收率和更好散热性能的激光晶体,进一步稳定抽运中心波长并提高注入功率,有望获得更佳的激光脉冲输出。

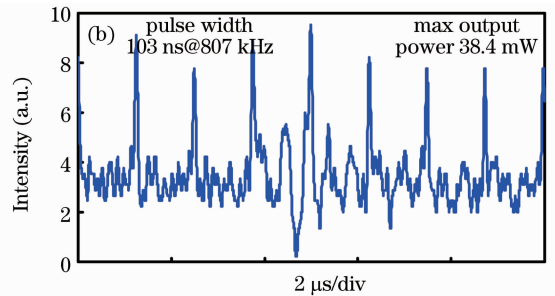
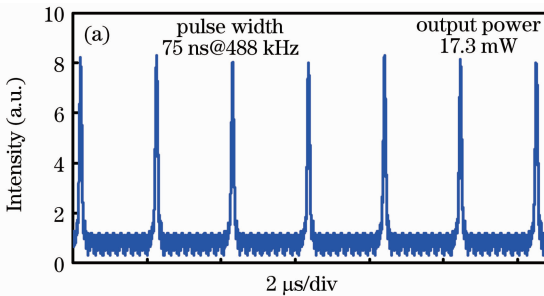


图 8 (a)输出功率 17.3 mW 时刻脉冲串;(b)最大输出功率 38.4 mW 时刻脉冲串

Fig. 8 (a) Pulse train for 17.3 mW output power; (b) pulse train for the max output power of 38.4 mW

## 4 结 论

构建了稳定运行的 Nd:YAG 晶体微片激光器,获得波长 1064 nm,最大输出功率 265 mW 的连续激光。使用镍基薄膜生长的石墨烯材料作可饱和吸收体,研究了基于石墨烯可饱和吸收体的 Nd:YAG 晶体微片激光器被动调 Q,获得最窄脉冲宽度 75 ns,最高单脉冲能量 54.7 nJ,重复频率 300~807 kHz,最大输出功率 38.4 mW(抽运功率 1.84 W)的调 Q 运转。

### 参 考 文 献

- 1 K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666~669
- 2 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 611~622
- 3 Amos Martinez, Kazuyuki Fuse, Bo Xu *et al.*. Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive

- mode-locked lasing [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 23054~23061
- 4 Wang Shuxiang, Chen Yunlin. Survey of microchip lasers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 401~406
- 王淑香, 陈云琳. 微片激光器的最新研究进展[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(4): 401~406
- 5 Liu Lei, Zhang Dayong. A tightly coupled diode pumped micro laser with passive Q-switch [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(6): 609~612
- 刘磊, 张大勇. LD 紧耦合泵浦被动调 Q 微型激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(6): 609~612
- 6 D. Nodop, J. Limpert. High-pulse-energy passively Q-switched quasi-monolithic microchip lasers operating in the sub-100-ps pulse regime[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2115~2117
- 7 Keun Soo Kim, Yue Zhao, Houk Jang *et al.*. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, **457**(7230): 706~710
- 8 Sasha Stankovich, Dmitriy A. Dikin, Richard D. Piner *et al.*. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide[J]. *Carbon*, 2007, **45**(7): 1558~1565
- 9 Claire Berger, Song Zhimin, Walt A. de Heer *et al.*. Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward

- graphene-based nanoelectronics[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, **108**(52): 19912~19916
- 10 Xu Jinlong, Li Xianlei, Wu Yongzhong *et al.*. Graphene saturable absorber mirror for ultra-fast-pulse solid-state laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(10): 1948~1950
- 11 Li Xianlei, Xu Jinlong, Wu Yongzhong *et al.*. Large energy laser pulses with high repetition rate by graphene Q-switched solid-state laser[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9950~9955
- 12 Wang Qing, Wei Zhiyi, Lin Jingjing *et al.*. Few-layer graphene as saturable absorber for Q-switched laser at sub-MHz repetition rate [C]. Istanbul, Turkey. Advances in Optical Materials (AIOM). Opt. Soc. Am., 2011: AIThF3
- 13 Yu Haohai, Chen Xiufang, Zhang Huaijing *et al.*. Large energy pulse generation modulated by graphene epitaxially grown on silicon carbide[J]. *Acsnano*, 2010, **4**(12): 7582~7586
- 14 Yu Haohai, Chen Xiufang, Zhang Huaijin *et al.*. Graphene as a Q-switcher for neodymium-doped lutetium vanadate laser[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(2): 022704
- 15 C. C. Lee, G. Acosta, S. Bunch *et al.*. Mode-Locking of an Er: Yb: glass laser with single layer graphene [C]. Snowmass Village, CO. International Conference on Ultrafast Phenomena (UP), 2010: TuE29
- 16 Liu Jiang, Wei Rusheng, Xu Jia *et al.*. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser with graphene epitaxially grown on 6H-SiC substrates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802003  
刘江, 魏汝省, 徐佳等. 基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯的被动锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802003
- 17 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001  
刘江, 吴思达, 王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001
- 18 G. J. Spühler, R. Paschotta, R. Fluck *et al.*. Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1999, **B-16**: 376

栏目编辑:宋梅梅