

# 基于半导体光放大器的自锁模激光器及重复频率分频现象

潘洪刚<sup>1,2</sup> 于晋龙<sup>1</sup> 王文睿<sup>1</sup> 张爱玲<sup>2</sup> 黄钢<sup>1</sup> 刘毅<sup>1</sup> 贾石<sup>1</sup> 杨恩泽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学电子信息工程学院, 天津 300372  
<sup>2</sup> 天津理工大学电子信息工程学院薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 在基于半导体光放大器的激光器中, 观察到了自锁模现象, 得到了脉宽分别为 30 ns 和 50 ns 的重复频率分别为 19.34 MHz 和 9.67 MHz 的光脉冲。激光器采用环形腔结构, 半导体光放大器为自锁模的关键器件, 当其抽运电流为 200 mA 时, 调整偏振控制器开始出现自锁模脉冲。实验调试过程中, 还观察到了重复频率的二分频现象, 即激光器输出的光脉冲的重复频率是激光器基频的 1/2。半导体光放大器的偏振旋转导致了输出激光功率的变化, 出现了高功率和低功率脉冲交替出现的现象, 即重复频率二分频现象。

**关键词** 激光器; 自锁模; 分频; 半导体光放大器

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1102006

## Semiconductor Optical Amplifier Based Self-Mode Locking Laser and Phenomenon of Dimidiate Frequency

Pan Honggang<sup>1,2</sup> Yu Jinlong<sup>2</sup> Wang Wenrui<sup>1</sup> Zhang Ailing<sup>2</sup> Huang Gang<sup>1</sup>  
Liu Yi<sup>1</sup> Jia Shi<sup>1</sup> Yang Enze<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300372, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** In experiment of semiconductor optical amplifier based laser, the phenomenon of self-mode locking is observed. Pulse duration of 30 ns and 50 ns are achieved with repetition frequencies of 19.34 MHz and 9.67 MHz, respectively. The laser adopts a ring cavity configuration, with semiconductor optical amplifier used as key device of the self-mode locking. When the pump current adds to 200 mA, self-mode locking pulse is observed after adjusting the polarization controller. In addition, the phenomenon of dimidiate frequency is observed, that is the repetition frequency of the pulses is equal to half of the cavity fundamental frequency. The effect of polarization rotation caused by the semiconductor optical amplifier leads to the change in output power, which is, the alternation of pulses with high power and low power, which is called the phenomenon of dimidiate frequency.

**Key words** lasers; self-mode-locking; dimidiate frequency; semiconductor optical amplifier

**OCIS codes** 140.3510; 140.3560; 140.4050

## 1 引言

自锁模激光器指的是那些除了激光介质之外没有其他功能(主动或被动)元件来产生短脉冲的锁模激光器。由于它的输出不稳定, 自锁模被认为是一种仅有理论研究意义而无实用价值, 在实验上应尽

量避免的现象<sup>[1-2]</sup>。气体激光器的自锁模现象也有所突破, 在 He-Ne 激光器中, 通过反馈(调节腔长)可以获得稳定的自锁模脉冲输出<sup>[3]</sup>。在 CuBr 激光器中<sup>[4]</sup>, 只需在腔内加一个小孔(滤掉高阶横模)就可以获得高稳定性的自锁模脉冲输出。这证明了自

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-05-30

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603, 2010CB315704), 国家杰出青年科学基金(61205061)

作者简介: 潘洪刚(1979—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: phg022@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤通信和非线性光纤等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tj.tj. edu. cn(通信联系人)

锁模不是没有实用价值,而是很有应用前途的一种技术。自锁模激光器在气体激光器中得到了广泛的报道<sup>[3-4]</sup>,光纤激光器作为非常重要的一类主要使用掺稀土光纤作为增益介质固体激光器,同样有很多自锁模现象的报道<sup>[5-7]</sup>。近年来,半导体光放大器(SOA)由于其非均匀展宽的特性以及其易于和其他元件集成的特性被广泛应用于激光器的研究<sup>[8-12]</sup>,Pleros等<sup>[9]</sup>将1550 nm的SOA作为增益介质,实现了功率均衡的多波长激光器。Yang等<sup>[10]</sup>报道了在一个基于SOA的被动锁模激光器中,应用线性起偏器,产生了亚皮秒量级的脉冲。然而在这些关于SOA激光器的文献中,并没有关于自锁模激光器的报道。

在基于半导体光放大器激光器实验当中,观察到了脉宽为30 ns和50 ns的自锁模脉冲,并观察到了重复频率二分频现象,到目前为止,没有看到类似的报道。

## 2 实 验

实验装置如图1所示,SOA(CIP:SOA-XN-OEC-1550)在激光器中有两个任务,一是作为激光器的增益介质,二是引入非线性偏振旋转<sup>[10]</sup>;隔离器使激光腔内的光做单向运转;可调高斯型带通滤波器(带宽为1 nm)起到选择波长的作用,并且可以限制激光器起振的模式数量,避免模式之间争抢载流子。在连接光纤时,为了防止法兰连接的地方有光的反射,影响激光器的腔基频,器件的尾纤用熔

接机直接焊接在了一起。将80:20耦合器的20%端口接光谱仪(Spectrometer: Anritus MS9710C型,分辨率:0.05 nm),并通过一个3 dB带宽为150 MHz的光电探测器后接到示波器(Oscilloscope: TOKOGAWA,采样率:500 MHz)和频谱仪(Spectrum analyzer: HP 8563E,频率范围:0~26.5 GHz)上,整个激光器的腔长是10.5 m,按光纤的纤芯折射率1.47计算,激光器的腔基频约为19.4 MHz。

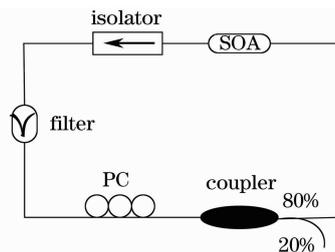


图1 自锁模激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic setup diagram of the self-mode locking fiber laser

实验过程中,改变SOA的驱动电流,当其到达200 mA时,通过调整偏振控制器(PC),得到如图2(a)、(b)所示脉冲宽度为30 ns、脉冲重复频率为19.34 MHz的脉冲。图2(c)光谱上中心波长是1549.75 nm,这是由滤波器的中心波长决定的。当继续调整PC,发现如图3(a)所示的时域波形图和图3(b)所示的频谱图,激光器重复频率变为腔基频的一半,即9.67 MHz,此时的光谱图和图2(c)中基本是一样的。

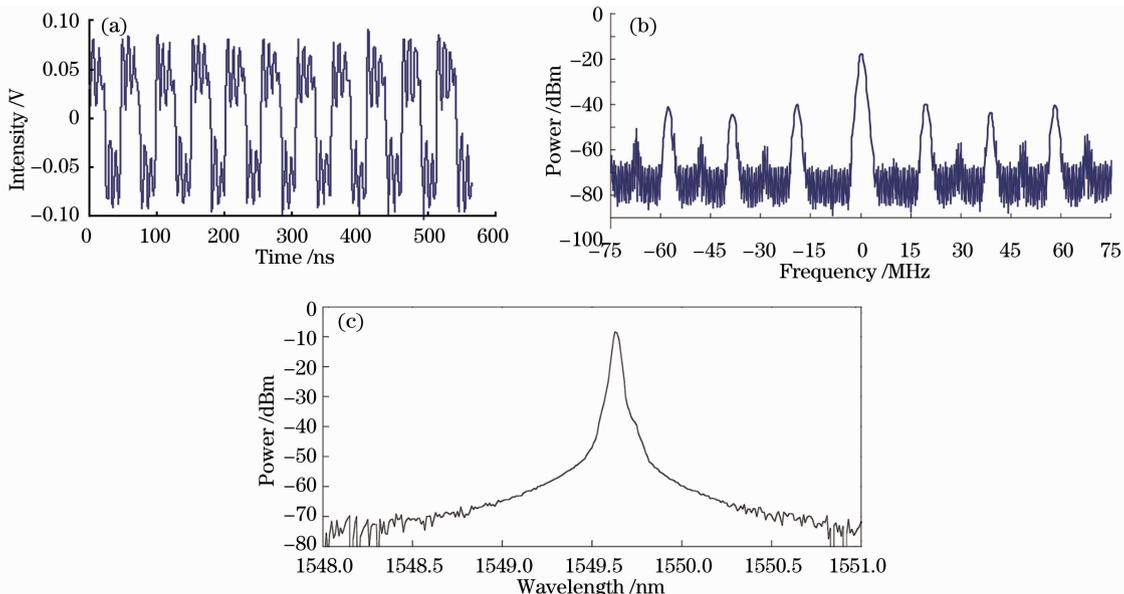


图2 (a) 时域波形图; (b) 频谱图; (c) 光谱图

Fig. 2 (a) Time-domain waveform; (b) spectrogram; (c) spectrum

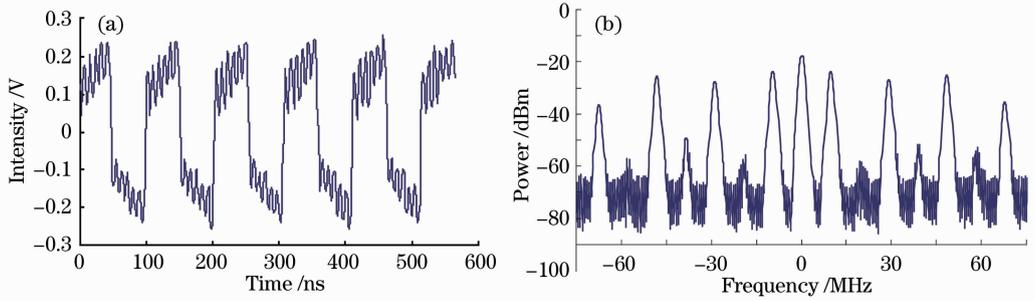


图3 (a) 时域波形图；(b) 频谱图

Fig. 3 (a) Time-domain waveform; (b) spectrogram

在实验过程中加入不同长度的跳线,改变激光器基频,都能够得到重复频率为腔基频一半的脉冲,并且实验结果稳定、重复性非常好。将腔内的器件分别做了更换,分频现象也没有消失,可以判断这个现象不是由某个器件的缺陷造成的。在图 2(a) 中示波器的时域波形中,采用的是交流耦合的探测器,如果把实验中交流耦合的探测器换做一个直流耦合探测器,并把示波器设为直流耦合方式,得到如图 4 所示的时域波形,说明输出光的功率大小是周期性变化的,‘0’码处光功率不为零。

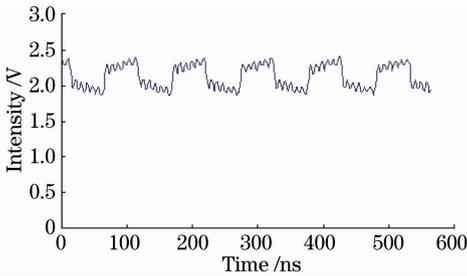


图4 直流耦合的时域波形图

Fig. 4 Waveforms of direct current coupling

## 3 结果及讨论

### 3.1 自锁模现象的分析

自锁模激光器与主动锁模和被动锁模相比较,锁住的模式比较少,那么没有锁住的模式(模式之间没有固定的相位关系)以随机相位叠加在已经锁住的模式(相位间有固定的相位关系)上,导致脉冲比较宽(纳秒量级),并且有直流光分量<sup>[5]</sup>。非线性偏振旋转产生超短脉冲的报道已经很多<sup>[10]</sup>,在实验中,半导体光放大器具有非线性偏振旋转效应,理论上能够产生光脉冲,但是由于这种效应比较弱,远不如偏振分束器和偏振控制器联合产生的非线性偏振旋转效应那样强,所以不能产生完全的锁模脉冲,而只能产生自锁模现象,因此在图 4 得到的时域波形图中,不只观察到有光功率的起伏变化(光脉冲),而且还有直流光

的存在,即在‘0’码处光功率不为零。

### 3.2 重复频率分频现象的分析

在 SOA 中,偏振旋转由两种原因产生:1) 光的 TE 模式和 TM 模式在 SOA 中获得的增益不同,这样,TE 模式和 TM 模式之间的增益比值发生变化,导致出射光的偏振态发生改变;2) SOA 本身的固有双折射以及 SOA 自身发出的光引入的附加双折射,因而光的 TE/TM 模式会在 SOA 中经历不同的折射率,致使 TE/TM 模式的相位变化不同。因此,当光波经过 SOA 时,其偏振态会发生改变,这就是非线性偏振旋转效应(NPR)<sup>[13]</sup>。

分别将光的 TE 模式方向和 TM 模式方向设为与  $x$  轴和  $y$  轴方向重合,行波方向设为  $z$  轴。假设入射到 SOA 中的光为线偏振态,并且偏振方向与 SOA 的 TM 轴,也即  $y$  轴成  $\theta$  角,输入信号的振幅为  $E$ ,初始相位为  $\varphi_0$ (通常设为 0), $\mathbf{u}_{TE/TM}$  是水平(或垂直)轴的单位矢量,如图 5 所示。

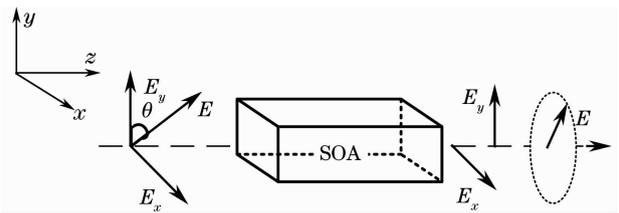


图5 SOA-NPR 产生机制示意图

 Fig. 5 Schematic diagram of SOA-NPR mechanism  
进入 SOA 的初始光场表达式为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{E}_0 = E \sin \theta \exp(i\phi_0) \mathbf{u}_{TE} + E \cos \theta \exp(i\phi_0) \mathbf{u}_{TM}, \quad (1)$$

SOA 中传输时,利用琼斯矩阵表示的光场为

$$\mathbf{E} = \exp[i(\omega t - kz + \phi_0)] \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{TE} \exp(i\Delta\phi_{TE}) \\ \mathbf{E}_{TM} \exp(i\Delta\phi_{TM}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{E}_{TE/TM}$  分别为 SOA 中传输光场的 TE/TM 分量, $\phi_{TE/TM}$  分别为 TE/TM 模式的相移量; $\mathbf{E}_{TE/TM}$  的表达式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{TE} = GE \sin \theta \mathbf{u}_{TE} \\ \mathbf{E}_{TM} = E \cos \theta \mathbf{u}_{TM} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $G$  为 TE 模式与 TM 模式的单程增益比。载流子浓度为零时, 设 TE 模、TM 模的模式波导折射率分别为  $n_r^{TE}$ 、 $n_r^{TM}$ , 当有源区中载流子的浓度改变  $\Delta N$  时, 将导致有源区折射率发生变化, 进而导致 TE 和 TM 模式发生变化, 设  $\Gamma$  为光场限制因子,  $\frac{dn}{dN}$  为微分折射率, 对应于 TE 和 TM 模, 它们的模式折射率分别为

$$\begin{aligned} n^{TE} &= n_r^{TE} + \Gamma^{TE} \frac{dn^{TE}}{dN} \Delta N \\ n^{TM} &= n_r^{TM} + \Gamma^{TM} \frac{dn^{TM}}{dN} \Delta N. \end{aligned} \quad (4)$$

波导折射率  $n_r^{TE}$  和  $n_r^{TM}$  的不同, 表征了 SOA 的固有双折射,  $\Gamma \frac{dn}{dN} \Delta N$  则代表了模式折射率随载流子浓度, 而 TE/TM 两个模式的相移  $\Delta\phi_{TE/TM}$  分别定义为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{TE} = \frac{2\pi L n^{TE}}{\lambda} \\ \Delta\phi_{TM} = \frac{2\pi L n^{TM}}{\lambda} \end{cases}. \quad (5)$$

式中  $L$  是 SOA 的有源区长度,  $\lambda$  是光信号的波长,  $n_{TE/TM}$  是两个模式的有效折射率。

两个模式间的相移差为<sup>[13]</sup>

$$\Delta\phi_{TE-TM} = \Delta\phi_{TE} - \Delta\phi_{TM}, \quad (6)$$

由(2)、(3)式可知, 输出 SOA 的光场  $E_1$  可表示为

$$\begin{aligned} E_1 &= GE \sin \theta \exp(i\Delta\phi_{TE}) + E \cos \theta \exp(i\Delta\phi_{TM}) = \\ &GE \sin \theta [\cos(\Delta\phi_{TE}) + i\sin(\Delta\phi_{TE})] + \\ &E \cos \theta [\cos(\Delta\phi_{TM}) + i\sin(\Delta\phi_{TM})], \end{aligned} \quad (7)$$

那么, 输出光场振幅的平方可表示为

$$\begin{aligned} |E_1|^2 &= [GE \sin \theta \cos(\Delta\phi_{TE}) + E \cos \theta \cos(\Delta\phi_{TM})]^2 = \\ &G^2 E^2 \sin^2 \theta + E^2 \cos^2 \theta + 2GE^2 \cos(\Delta\phi_{TE} - \Delta\phi_{TM}). \end{aligned} \quad (8)$$

输出光功率和输入光功率之比为

$$\frac{|E_1|^2}{|E_0|^2} = G^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta + 2G \cos(\Delta\phi_{TE} - \Delta\phi_{TM}). \quad (9)$$

设输出光场方向和 TM 方向所成角度为  $\alpha$ , 则有

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{G \sin \theta \cos(\Delta\phi_{TE}) + \cos \theta \cos(\Delta\phi_{TM})}{G \sin \theta \sin(\Delta\phi_{TE}) + \cos \theta \sin(\Delta\phi_{TM})} \right]. \quad (10)$$

由(8)、(9)式可知, 由于光场通过 TE 模式/TM 模式的增益经历的折射率不同, 导致从 SOA 输出信

号的偏振态和功率不同于进入 SOA 时的偏振态和功率, 即发生了偏振旋转效应。显然, 参数  $G$ 、相位差  $\Delta\phi_{TE-TM}$  以及输入光场和 TE/TM 模式所成的角度  $\alpha$  的大小共同决定了输出信号的偏振态和功率。实验中得到两种不同功率的脉冲具有不同的偏振态, 低功率脉冲经过 SOA 时, 除了由于在 TE/TM 模式上增益不同而引起的固有双折射外, 还产生一个相对较小的附加双折射, 二者的共同作用使 SOA 的输出脉冲变成另外一种偏振态且功率较大, 经过激光腔内的光纤以后再次到达 SOA 的输入端时, 脉冲的偏振态和功率已经不同于前一次; 此脉冲经过 SOA 时, 同样具有由在 TE/TM 模式上增益不同引起的线性双折射, 并且有一个比较大的附加双折射, 两者的共同作用使 SOA 的输出脉冲变成另外一种偏振态且输出光功率较小。当实验中的偏振控制器偏振片的位置和 SOA 的驱动电流大小合适时, 功率不同的两个脉冲达到动态平衡, 因此出现了高、低脉冲功率交替出现现象, 即分频现象。

## 4 结 论

实验研究了基于半导体光放大器的自锁模激光器, 得到了自锁模脉冲, 同时还观察到了脉冲的重复频率分频现象, 脉冲在 SOA 中偏振旋转导致了这一结果。实验中得到的自锁模脉冲, 可应用于光通信、光信号处理等方面, 而对分频现象产生原因的分析也有利于 SOA 更好地应用于激光器的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Bai Yingxin, Wang Zhijiang. Self-mode-locked laser[J]. *Physics*, 1994, 23(3): 147-152.
- 白迎新, 王之江. 自锁模激光器[J]. *物理*, 1994, 23(3): 147-152.
- 2 E Yablonovitch. Photonic band-gap structures[J]. *J Opt Soc Am B*, 1993, 10(2): 283-295.
- 3 K M Ho, C T Chan, C M Soukoulis. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 65(25): 3152-3155.
- 4 W M Robertson, G Arjavalingam. Measurement of photonic band structure in a two-dimensional periodic dielectric array[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(13): 2023-2026.
- 5 E M Pessina, G Bonfrate, F Fontana, *et al.*. Experimental observation of the Risken-Nummedal-Graham-Haken multimode laser instability [J]. *Physical Review A*, 1997, 56(5): 4086-4093.
- 7 V J Matsas, D J Richardson, T P Newson. Characterization of a self-starting, passively mode-locked fiber ring laser that exploits nonlinear polarization evolution [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(5): 358-360.
- 8 A A Moiseev, G V Gelikonov, E A Mashcovitch. Tilted short base Fabry-Perot interferometer with inverted resonances in feedback system of widely tunable linear laser[J]. *Laser Phys*

Lett, 2010, 7(7): 505–509.  
 9 N Pleros, C Bintjas, M Kalyvas. Multiwavelength and power equalized SOA laser sources[J]. Photon Technol Lett, 2002, 14(5): 693–695.  
 10 X Yang, Z Li, E Tangdiangga, *et al.*. Sub-picosecond pulse generation employing an SOA-based nonlinear polarization switch in a ring cavity[J] Opt Express, 2004, 12(11): 2448–2453.  
 11 A A Latif, H Ahmad, M Z Zulkifli. Tunable high power fiber laser using an AWG as the tuning element laser[J]. Phys, 2011,

21(4): 712–717.  
 12 F M Wu, P C Peng, J Chen, *et al.*. SOA-based fiber ring laser use in a photonic radio-frequency phase shifter[J]. Laser Phys, 2011, 21(3): 522–525.  
 13 B F Kennedy, S Philippe, P Landais. Experimental investigation of polarization rotation in semiconductor optical amplifiers[J]. IEE Proceedings Opto-Electronics, 2004, 151(2): 114–118.

栏目编辑:宋梅梅

## 国产大模场双包层光子晶体光纤实现高效率飞秒激光放大

近年来,高功率飞秒激光输出成为激光领域的研究热点之一,其可以广泛应用于激光加工和国防激光武器等领域,是目前重点研究的热门领域。在高功率方面,大模场面积光子晶体光纤能够提供很大的模面积,并且支持高质量单横模激光的传输和输出。但是目前该种光纤的制作主要由丹麦 NKT 公司掌握,国内多个研究单位都大力投入人力和物力解决该难题。最近,华中科技大学/武汉光电国家实验室光纤激光技术团队成功控制出高掺杂、大模场面积的光子晶体光纤,天津大学超快激光研究室利用该光纤实现了高效率的飞秒激光放大实验。实验中采用非线性偏振旋转锁模光纤激光器作为振荡级种子光,其输出脉宽为 227 fs,平均功率为 190 mW。放大级采用 976 nm 激光反向抽运,2 m 长国产掺 Yb<sup>3+</sup> 大模场双包层光子晶体光纤作为增益介质,其端面均被打磨成 8° 以避免光纤端面反馈形成的自激振荡。飞秒激光经过放大后,由于光纤色散展宽和非线性自相位调制的作用,直接输出脉

宽为 1.39 ps。当放大系统抽运功率为 4 W 时,通过放大器得到 1.64 W 的激光输出,如图 1 所示,放大器斜率效率为 49.8%。这充分证明了国产大模场光子晶体光纤已经达到国际先进水平,为实现高功率、高质量的光纤激光打下了基础。

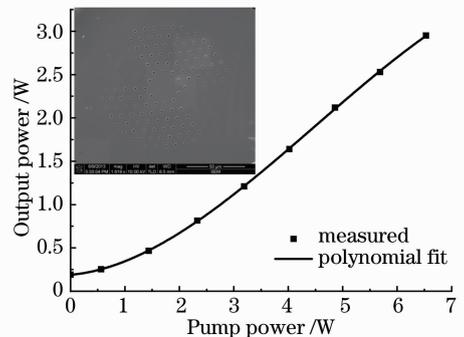


图 1 放大器输出的平均功率随抽运功率的变化曲线, 插图为光纤端面扫描电镜图  
 Fig. 1 Curve of output power versus pump power in amplifier, and the inset shows a scanning electron microscope image of the fiber

崔元玲<sup>1</sup> 黄莉莉<sup>1</sup> 柴路<sup>1</sup> 胡明列<sup>1,\*</sup> 王清月<sup>1</sup> 陈瑰<sup>2</sup> 赵楠<sup>2</sup> 李进延<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

<sup>2</sup> 华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074

\* E-mail: huminglie@tju.edu.cn

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-08-28