

利用全光纤环形谐振器实现对单频激光器 频率噪声的抑制

胡永奇^{1,2} 董 靖^{1,2} 黄军超^{1,2} 王秀梅^{1,2} 成华东¹ 李 唐^{1*} 刘 亮¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 给出了利用全光纤环形谐振器实现对激光器频率噪声抑制的原理和实验结果。采用 Pound-Drever-Hall 的方法对锁定在铷原子吸收谱线上的激光进行稳频, 实现了饱和吸收光谱与光纤环形谐振器双回路锁定。通过外差式马赫-曾德干涉仪来测量锁定后的激光器频率噪声发现, 在频率 100 Hz 时, 光纤环形谐振器对频率噪声的抑制度超过了 40 dB。在 1 Hz 处, 稳频激光器的频率噪声小于 100 dB Hz²/Hz, 其抑制度达到 60 dB。

关键词 激光器; 激光稳频; 光纤环形谐振器; 频率噪声; 饱和吸收光谱

中图分类号 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802012

Frequency Noise Suppression of Single-Frequency Laser by All-Fiber Ring Resonator

Hu Yongqi^{1,2} Dong Jing^{1,2} Huang Junchao^{1,2} Wang Xiumei^{1,2} Cheng Huadong¹

Li Tang¹ Liu Liang¹

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The principle and experimental results of laser frequency noise suppression by all-fiber ring resonator is provided. A saturated absorption spectroscopy and fiber ring resonator double-loop-stabilization for laser frequency is realized by Pound-Drever-Hall technique. The frequency noise of stabilized laser is measured by a heterodyne Mach-Zehnder interferometer and obtain the frequency noise suppression larger than 40 dB when Fourier frequency $f < 100$ Hz. At 1 Hz offset, the frequency noise power spectral density of stabilized laser is less than 100 dB Hz²/Hz and the frequency noise suppression is 60 dB.

Key words lasers; laser stabilization; fiber ring resonator; frequency noise; saturated absorption spectroscopy;

OCIS codes 140.3425; 300.1030; 060.2310

1 引 言

全光纤环形谐振器在波分复用系统^[1-2], 光纤陀螺^[3-4]和激光频率稳定^[5-6]等领域都有着重要的应用。利用全光纤环形谐振器实现对锁定在铷原子吸收谱线上的激光进行频率噪声的抑制。利用这种频率噪声抑制后的激光来探测原子钟跃迁信号, 可以提高信号的信噪比, 进而提高原子钟的频率稳定度^[7]。

原子钟跃迁信号的探测中, 吸收法探测被广泛的应用^[7-9]。吸收法探测属于振幅型探测, 所以要求探测光的振幅噪声很低。在吸收法探测中, 激光通过原子介质会使得介质的电极化率随着激光频率噪声而起

收稿日期: 2015-03-05; 收到修改稿日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(11034008, 11274324), 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-W02)

作者简介: 胡永奇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事稳频激光器方面的研究。E-mail: yongqihu@foxmail.com

导师简介: 李 唐(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事量子频标与稳频激光器方面的研究。

E-mail: litang@siom.ac.cn(通信联系人)

伏。这种电极化率的起伏,会引入激光光强的起伏,即把激光的频率噪声转化成了光强强度噪声。这样就会降低用吸收法探测到的原子钟跃迁信号的信噪比,使得原子钟的频率稳定度变差。Camparo等^[10]在研究中发现,更窄线宽的激光会减少这种原因产生的光强强度噪声。所以在原子钟的实验中,实现对探测激光频率噪声的抑制来获得更窄线宽的探测光极为重要。

在实现对激光线宽压窄的诸多方法中^[11-14],利用法布里-珀罗(FP)腔来锁定激光进行线宽压窄具有非常优良的性能。但是这种方法也存在一些缺点:光学结构复杂,需要光路和参考腔的空间模式精确匹配;体积较大;对环境参数敏感。相比之下,利用全光纤环形谐振器的方法来对激光线宽压窄,具有体积小、结构简单、易于集成以及不需要自由空间光路调节等优点。2008年,Merrer等^[5]提出利用全光纤环形谐振器来实现对激光器频率进行稳定的思想,但是到目前为止还没有实验上的报道。文中实现了利用全光纤环形谐振器的方法来抑制外腔反馈式半导体激光器(ECDL)的激光频率噪声,在低频端其抑制度超过40 dB。

2 原理分析

光纤环形谐振器的原理图如图1所示。激光从定向耦合器的端口1入射,入射的光被耦合到端口3输出。从端口3输出的光经过光纤环路入射到端口2,从端口2入射的光一部分被耦合到端口4输出,另一部分被耦合到端口3经过光纤环路再次入射端口2,从而形成光的闭合回路。

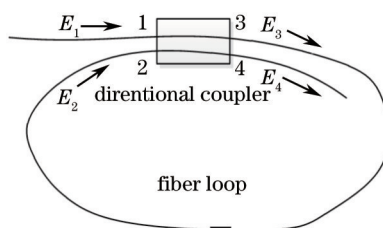


图1 全光纤环形谐振器原理图

Fig.1 Schematic of all-fiber ring resonator

光纤定向耦合器的输入光强和输出光强满足下式^[15]:

$$|E_3|^2 + |E_4|^2 = (1 - \gamma_0)(|E_1|^2 + |E_2|^2), \quad (1)$$

式中 γ_0 为耦合器的插入损耗, E_i ($i=1,2,3,4$) 为4个端口的电场复振幅。经过耦合模式的相互作用之后,从定向耦合器输出的电场复振幅可以表示为

$$E_3 = \sqrt{1 - \gamma_0}(\sqrt{1 - \kappa} E_1 + j\sqrt{\kappa} E_2), \quad (2)$$

$$E_4 = \sqrt{1 - \gamma_0}(j\sqrt{\kappa} E_1 + \sqrt{1 - \kappa} E_2), \quad (3)$$

式中 κ 为光强耦合系数。从端口3输出的光经过光纤环路传播到端口2,在光纤环路上,光纤熔接所引入的损耗远大于光纤本身所引入的损耗,所以忽略光纤本身引入的损耗而只考虑光通过熔接点所产生的损耗。令这个损耗为 $\tau = |E_2/E_3|$,则在端口2的电场幅度可以表示为

$$E_2 = \tau \exp(j\beta L) E_3, \quad (4)$$

式中 L 为光纤环路的长度, $\beta = n\omega/c$ 为光在光纤内的传播常数, n 为光纤的折射率, ω 为光角频率, c 为光在真空中的传播速度。由(1)~(4)式可以得到:

$$\frac{E_4}{E_1} = \frac{j\sqrt{1 - \gamma_0}\sqrt{\kappa} + (1 - \gamma_0)\tau \exp(j\beta L)}{1 - j\sqrt{1 - \gamma_0}\sqrt{\kappa}\tau \exp(j\beta L)}. \quad (5)$$

要使环形谐振器内的光谐振并且使得透射率函数 $\left| \frac{E_4}{E_1} \right|$ 在谐振时为零,则(5)式的实部和虚部均为零^[10]。

即谐振条件为: 1) $\beta L = 2n\pi - \pi/2$ ($n=0,1,2,\dots$); 2) $\tau^2 = \kappa/(1 - \gamma_0)$ 。当(1)式满足而(2)式不满足时,透射率函数

$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|$ 的幅值与环内光纤的传播损耗有关,如图2所示。当环内光纤损耗满足时,透射率函数为零,此时,环形

谐振器的鉴频信号对比度最大。此时, 环形谐振器的自由光谱范围 $f_{\text{FSR}} = \frac{c}{nL}$, 线宽 $\Delta\nu = \frac{c}{nL} \frac{1-\kappa}{\pi\sqrt{\kappa}}$, 因此其精细度可以表示为^[15]

$$F = \frac{f_{\text{FSR}}}{\Delta\nu} = \frac{\pi\sqrt{\kappa}}{1-\kappa}. \quad (6)$$

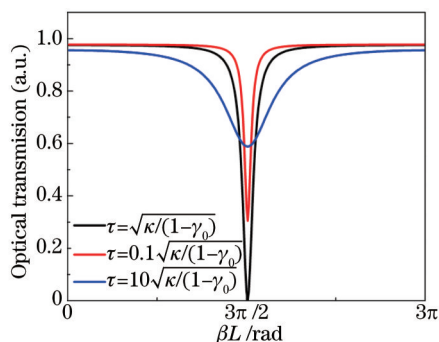


图2 光纤环形谐振器在不同插入损耗下的光强透射率

Fig.2 Intensity transmission of fiber ring resonator with different insertion losses

采用 Pound–Drever–Hall(PDH)的方法对激光器进行稳频^[14], 其原理图如图3所示。图中红线、蓝线、黑线分别代表光信号、射频信号和低频电信号。激光器输出的光经过电光调制器(EOM)后进入光纤环形谐振器。谐振器透射出来的光进入光电管(PD)把光信号转换为射频信号, 这个信号经过移相解调后得到鉴频误差信号(其理论曲线如图4所示), 其表达式如下^[16]:

$$D(\Delta\omega) = -4 \frac{\omega_m^2 (\Gamma/2) \Delta\omega [(\Gamma/2)^2 - \Delta\omega^2 + \omega_m^2]}{[\Delta\omega^2 + (\Gamma/2)^2][(\Delta\omega + \omega_m)^2 + (\Gamma/2)^2][(\Delta\omega - \omega_m)^2 + (\Gamma/2)^2]}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega$ 为激光频率对环形谐振器谐振频率的失谐量, ω_m 为调制频率, Γ 为环形谐振器的线宽。

从图4中看到, 在频率对应环形谐振器的谐振点附近的时候, 误差信号呈现出正的鉴频特性: 激光频率的变化被转化为误差信号电压的变化。将这个变化的误差信号反馈回激光器抑制其频率起伏, 就可以降低激光器频率噪声, 进而压窄其频率线宽。与此同时, 利用频率调制光谱技术(FM)通过 EOM 对光进行频率调制, 可以有效降低激光强度噪声、探测器噪声等基带噪声对稳频系统的影响。

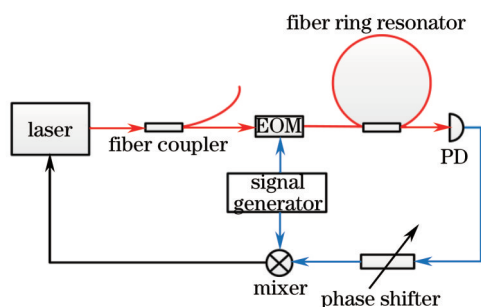


图3 PDH方式抑制激光频率噪声示意图

Fig.3 Schematic of laser frequency noise suppression by PDH method

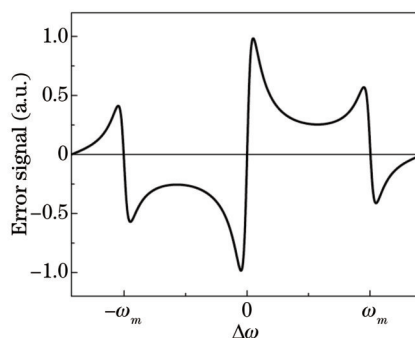


图4 PDH鉴频误差信号

Fig.4 PDH frequency discrimination error signal

3 实验装置

在这个实验中, 要对原子钟中探测 ^{87}Rb 原子基态跃迁的激光进行噪声抑制。利用饱和吸收光谱技术, 激光器首先被锁定在 ^{87}Rb 原子 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=1\rangle$ 与 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 的交叉吸收峰上。经过饱和吸收锁频的激光通过 PDH 技术再利用光纤环形谐振器进行频率噪声压制。由于受到温度的影响, 光纤环形谐振器的谐

振频率会发生漂移,在实验中将误差信号反馈给一个声光调制器来补偿这个频率漂移。

具体实验装置如图5所示。780 nm外腔半导体激光器(TA100,Toptica)出射的光经过一个半波片和偏振分束器PBS1后分束。一部分光作为输出激光,另一部分准直后输入EOM,EOM的调制频率为35 MHz。将调制后的光信号通过偏振分束器PBS2分成两束,一束光输入到铷原子气池做饱和和吸收光谱,光电管PD1探测信号经过解调后反馈给激光器的压电陶瓷控制器(PZT)将激光频率锁定在铷原子的吸收谱线上。另一束光经过准直输入偏振分束器PBS3经过声光调制器(AOM)来回两次移频,共移频220 MHz,然后经过准直后输入光纤环形谐振器。光电管PD2探测到的射频信号经过放大解调后得到误差信号,这个误差信号经过伺服电路后分两路。其中慢速控制信号送给用来驱动AOM的压控振荡器(VCO)来补偿光纤环形谐振器因为温度变化而产生的频率漂移,而快速信号送给激光器的电流调制端口来抑制激光器的频率噪声。光纤环形谐振器被放置在一个 $\Phi 115$ mm密封铝罐中,铝罐进行主动控温,其24 h温度变化小于1 mK。

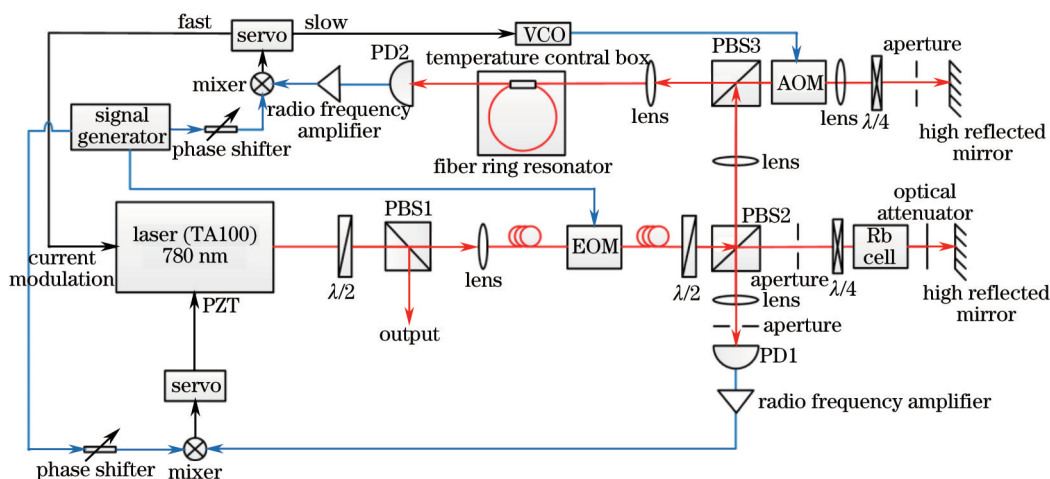


图5 利用光纤环形谐振器抑制激光器频率噪声的实验装置图

Fig.5 Experimental setup of laser frequency noise suppression by fiber ring resonator

在3个控制回路中,饱和吸收锁频的控制带宽约为100 Hz,光纤环形谐振器反馈激光电流的控制带宽约为300 kHz,反馈AOM补偿频率漂移的带宽约为10 Hz。这既保证了有很大的带宽来抑制激光器的频率噪声,又保证了激光器长期频率锁定在原子的饱和和吸收谱线上。

所用的环形谐振器的光纤长度为2 m,对应的自由光谱范围 $f_{FSR} = 100$ MHz。光纤耦合器采用90/10的分光比率,通过厂家测定得知 $\kappa = 0.897$, $\gamma_0 = 0.022$,当透射率函数的对比度最大,需要控制光纤的熔接损耗 $\alpha_0 = 20 \lg(1/\tau) = 0.37$ dB。根据这个损耗计算得到环形谐振器的线宽 $\Delta\nu = 3.5$ MHz,精细度 $F = 28.57$ 。

4 实验结果

图6是实际测得的光纤环形谐振器的透射率,其洛伦兹线宽为10.7 MHz,对比度约为60%。造成实际测量线宽大于理论计算线宽的原因是光纤熔接机的熔接损耗很难精确控制,导致光纤实际插损大于理论值。

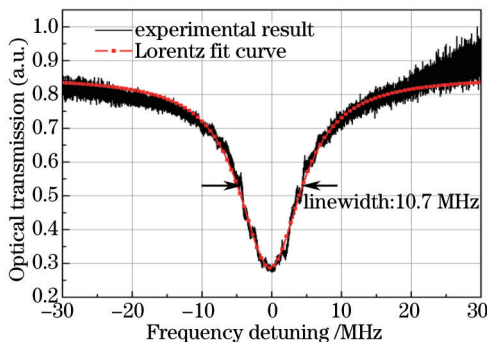


图6 实验所测的光纤环形谐振器光强透射率

Fig.6 Intensity transmission of fiber ring resonator in experiment

采用外差式马赫-曾德干涉仪来测量激光器的频率噪声(如图7所示)。激光器的频率起伏 δv 在这里被转化为光电管探测到射频信号的相位起伏 $\delta\varphi$ 。因此,激光器的频率噪声谱密度可以用下式表达:

$$S_v(f) = \frac{S_\varphi(f)}{(2\pi\tau)^2}, \quad (8)$$

式中 $S_v(f)$ 为激光器的频率噪声谱密度, $S_\varphi(f)$ 为射频信号的相位噪声谱密度, τ 为干涉仪两臂的时延差, f 为傅里叶频率。通过测量外差射频信号的相位噪声就可以得到激光器的频率噪声。在实验中,干涉仪的两臂长度差为 10 m,对应的时延差为 50 ns。测得结果如图8所示。当激光器仅锁定饱和吸收谱线时,其频率噪声在低频端 ($f < 1$ kHz) 呈现 f^{-3} 频谱特征,在高频端 ($f > 10$ kHz) 呈现白噪声特征。通常来说,无外部干扰的自由运转的激光器在低频端呈现 f^{-1} 频谱特征,但是由于外部环境对激光器以及饱和吸收光谱的扰动导致其低频端噪声恶化。图10中曲线 *b* 为激光器同时锁定饱和吸收谱线与光纤环形谐振器时的频率噪声。可以看到在 $f < 1$ kHz 时,激光器的频率噪声被极大地抑制了;在 $f < 100$ Hz 时,光纤环形谐振器对频率噪声的抑制度超过了 40 dB。在 1 Hz 处,稳频激光器的频率噪声小于 100 dB Hz²/Hz,其抑制度达到 60 dB。从理论上说,稳频激光器的噪声极限应该为光纤环形谐振器的热噪声,但是在实际情况中,其频率噪声远大于这个理论极限。这主要是因为光纤环形谐振器的精细度不够高导致环外噪声对稳频激光器产生影响。尤其在低频端 ($f < 100$ Hz),稳频激光器的频率噪声主要受限于温度、气流、振动、声音等环境因素的干扰。

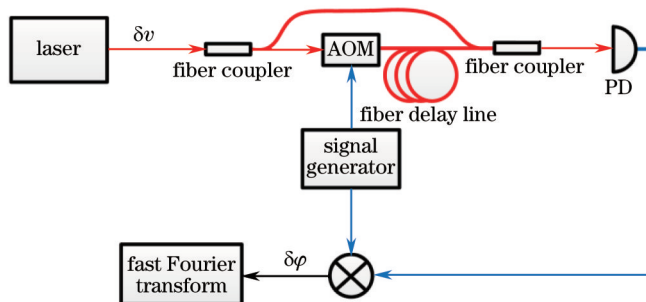


图7 激光器的频率噪声测量示意图

Fig.7 Schematic of laser frequency noise measurement

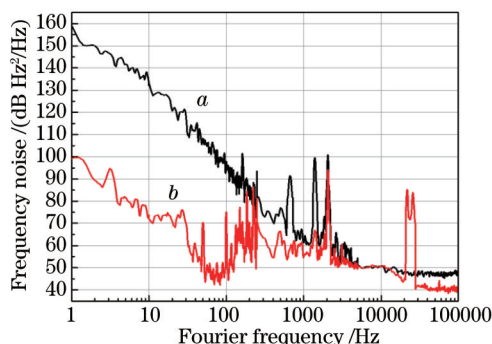


图8 激光器的频率噪声

Fig.8 Laser frequency noise PSD

5 结 论

对用于铷原子钟探测光的激光器进行稳频,实现了饱和吸收光谱与光纤环形谐振器双回路锁定。锁定光纤环形谐振器后激光器的频率噪声比锁定前改善超过 40 dB ($f < 100$ Hz),在 1 Hz 处其抑制度达到 60 dB。在下一步的工作中,将从以下几个方面进行改进:1) 改善光纤的熔接损耗控制,提高光纤环形谐振器的精细度;2) 采用全光纤光路替代现有光路,提高光路的稳定性;3) 改善光纤环形谐振器对环境干扰的隔离措施。

参 考 文 献

1 C Vaizquez, J Montalvo, P C Lallana. Ring resonators with Sagnac loops for photonic processing in DWDM backbone networks[C].

- IEEE International Symposium on IEEE, 2007, C.1-5.
- 2 Michael Gad, Jason Ackert, David Yevick. Ring resonator wavelength division multiplexing interleaver[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(14): 2102-2108.
- 3 Matthew A Terrel, Michel J F Dignonnet, Shanhui Fan. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(7): 931-937.
- 4 Michael Gad, David Yevick, Paul Jessop. High sensitivity ring resonator gyroscopes[J]. *Fiber & Integrated Opt*, 2011, 30(6): 395-410.
- 5 Pierre-Henri Merrer, Olivier Llopis, Gilles Cibiel. Laser stabilization on a fiber ring resonator and application to RF filtering[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2008, 20(16): 1399-1401.
- 6 Deng Shiguang, Jiang Yuesong, Li Zhidong, *et al.*. Laser diode frequency stabilization with a fiber ring resonator[J]. *Optoelectronics Lett*, 2010, 6(5): 380-383.
- 7 Salvatore Micalizio, Aldo Godone, Filippo Levi, *et al.*. Pulsed optically pumped ^{87}Rb vapor cell frequency standard: a multilevel approach [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(1): 013403.
- 8 C Affolderbach, F Droz, G Miletì. Experimental demonstration of a compact and high-performance laser-pumped rubidium gas cell atomic frequency standard[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2006, 55(2): 429-435.
- 9 Zheng Benchang, Cheng Huadong, Meng Yanling, *et al.*. Development of an integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Phys Lett*, 2013, 30(12): 123701.
- 10 J C Camparo, J G Coffer. Conversion of laser phase noise to amplitude noise in a resonant atomic vapor: the role of laser linewidth[J]. *Phys Rev A*, 1999, 59(1): 728-735.
- 11 Zhang Yin, Wang Qing. Research of automatic frequency stability diode laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602001.
张胤, 王青. 自动稳频半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0602001.
- 12 Ma Jiajun, Jiang Junbiao. Research on the frequency stabilization properties of total reflection prism laser gyros[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0102002.
马家君, 蒋军彪. 全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102002.
- 13 Huang Chongde, Chen Dijun, Cai Haiwen, *et al.*. Laser frequency stabilization technology based on hollow-core photonic crystal fiber gas cell[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802006.
黄崇德, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 空芯光子晶体光纤吸收池的激光稳频技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802006.
- 14 R W P Drever, J L Hall, F V Kowalski, *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl Phys B*, 1983, 31(2): 97-105.
- 15 L F Stokes, M Chodorow, H J Shaw. All-single-mode fiber resonator[J]. *Opt Lett*, 1982, 7(6): 288-290.
- 16 F Riehle. *Frequency Standards: Basics and Applications*[M]. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, 2004: 271-275.

栏目编辑: 宋梅梅