

文章编号: 0258-7025(2010)03-0658-05

砷化镓内电子谷间散射引起的增益

倪争技¹ 陈麟¹ 王淑玲¹ 张大伟¹ 何波涌² 朱亦鸣^{*,1,2}

(¹ 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; ² 上海交通大学微电子学院, 上海 200240)

摘要 运用时域太赫兹波谱法, 低温(10 K)高电场下本征砷化镓中受飞秒激光脉冲激发的电子所辐射出的太赫兹波被准确地测量出来。从样品中辐射出的和电子加速度/减速度成正比的太赫兹电磁波, 表现出双极特性。通过分析砷化镓中辐射出的太赫兹波的傅里叶变换谱, 在实验上得到阶跃电场下的砷化镓内因电子谷间散射而引起的增益极限频率, 可以达到约 750 GHz(10 K)。同时通过测量极限频率和温度的关系, 发现极限频率是电子经由纵光学声子从 L 谷到 Γ 谷的散射能量弛豫过程所需要的时间决定的。通过理论计算电子在 Γ 谷的弹道加速、电子谷间散射和电子经由纵光学声子连续散射在 Γ 谷的弛豫等过程的时间得出的增益极限频率与实验值吻合得较好。

关键词 光谱学; 砷化镓; 电子谷间散射; 增益; 时域太赫兹波谱法; 非平衡载流子

中图分类号 O473 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0658

Electrons Intervalley Transfer Gain in Bulk GaAs

Ni Zhengji¹ Chen Lin¹ Wang Shuling¹ Zhang Dawei¹ He Boyong² Zhu Yiming^{*,1,2}

¹ School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
² School of Microelectronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract By using time-domain terahertz (THz) spectroscopy, the THz waveforms emitted from bulk GaAs photoexcited by femtosecond laser pulses under very high electric fields at 10 K have been recorded. It is clearly seen that the THz emission waveforms show a bipolar feature i. e., an initial positive peak and a subsequent negative dip. Terahertz intervalley transfer gain under step-function-like input electric fields F has been obtained by calculating Fourier spectrum of the measured THz trace under various biased electric fields. We found it can reach 750 GHz for $F > 50$ kV/cm at 10 K. Furthermore, from the temperature dependence of the cutoff frequency for the gain, it is found that the cutoff frequency is governed by the energy relaxation process of electrons from L to Γ valley via successive longitudinal-optical phonon emission. The estimated cutoff frequencies, at 10 K by considering the time for electrons ballistic acceleration in Γ valley, intervalley transfer, relaxation in Γ valley via longitudinal-optical phonon scattering match the experimental results very well.

Key words spectroscopy; GaAs; electrons intervalley transfer; gain; time-domain terahertz spectroscopy; nonequilibrium carriers

1 引言

近年来, 对太赫兹波及其应用的研究正成为国内外光学、电子学等领域的一个新的研究热点。太赫兹电磁波频率大致从 300 GHz~300 THz, 介于微波和可见光波段之间。人们之所以长期以来无法

对太赫兹波及其应用进行有效的研究, 是因为到目前为止无法有效地把电能转换为太赫兹波段的电磁波, 即缺乏有效地太赫兹源器件。

耿氏二极管是目前最常用的亚太赫兹振荡器(价格低廉, 设备简单), 其工作频率一般最高在

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-07-04

基金项目: 上海市教育委员会、上海市教育发展基金会晨光计划(09CG49)和曙光计划(08SG48), 上海市教育委员会科研创新项目(09YZ221), 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(slg08005), 上海市委浦江人才计划(09PJ1407800)和上海市科技委员会项目(07DZ22026, 08530707400, 08ZR1415400, 08DZ2272800)资助项目。

作者简介: 倪争技(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事超快光学、薄膜技术和太赫兹技术与应用等方面的研究。

E-mail: sioi@usst.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ymzhu@usst.edu.cn

100 GHz左右。耿氏二极管之所以能产生微波,是由于制造耿氏二极管的基本材料砷化镓有着和许多III-V族半导体一样的特殊能带结构。这种特殊能带结构造成高电场下砷化镓内的电子会发生谷间散射,从而形成负微分电导现象^[1,2]。负微分电导的存在是形成电流振荡,进而激发出亚太赫兹电磁波的先决条件^[3,4]。

自从1993年耿(Gunn)^[3]首次在砷化镓中发现了电流的振荡以来,科学家们使用了无数方法,去研究高电场下砷化镓内负微分电导可以持续到的最高截止频率。意大利的Reklatis等^[5,6]先后采用多种方法,在理论上指出了多种半导体材料负微分电导所能达到的极限频率,如砷化镓内不同的高电场下,增益的极限频率基本在0.1~0.5 THz范围内。

然而,长期以来,由于各种问题,如很难得到超纯砷化镓样品和掺杂样品中易形成高电场畴;同时,由于无工作在太赫兹波段的可调谐的交流(AC)源等,人们无法在实验上探测砷化镓中的负微分电导特性,到目前为止实验测量仅局限在微波范围内^[7]。

近年来,随着太赫兹技术的发展^[8,9],科学家们利用时域太赫兹波谱法^[10~12]观察到亚皮秒尺度下电子的动态运动,德国科学家Leitenstorfer等^[13~16]用这种方法在实验中观察到了非平衡载流子的过热效应。最近的研究表明,此类时域太赫兹波谱测量其本质是测量电子系统在阶跃电场下的响应,提供了唯一的在太赫兹范围内观察材料的电导谱的机会^[17,18],即如果系统对所施加电场的响应是线性的,所测得的太赫兹波的傅里叶变换谱与电子系统的电导谱 $\sigma(\omega)$ 是成比例的。

借助自由空间电光取样方法,研究了高电场下,由飞秒激光脉冲激发的砷化镓内的非平衡载流子运动所辐射出的太赫兹波 $[E_{\text{THz}}(t)]$ 。发现从样品中辐射出的太赫兹电磁波表现出双极特性。这是由高电场下砷化镓中电子的谷间散射引起的。通过计算在不同电场下的太赫兹波的傅里叶变换谱,实验观察到了阶跃电场作用下电子的太赫兹功耗谱。在10 K下,发现由谷间散射引起的负功耗(即增益)的截止频率 ν_c 随着电场的增大而增大;最高可达到约750 GHz,此截止频率远大于蒙特卡罗模拟的预测。同时通过测量极限频率和温度的关系,发现极限频率由电子经由纵光学声子从L谷到 Γ 谷的散射能量弛豫过程所需要的时间决定。通过理论计算纵光学声子连续散射弛豫时间、电子的弹道加速所需时间以及电子谷间散射时间得出的增益极限频率与实

验值吻合得较好。

2 实 验

实验中使用的样品是由分子束外延技术(MBE)在n型砷化镓基板上(001)方向生长的未掺杂本征砷化镓层形成的二极管结构。样品为m-i-n型结构的二极管,其中间的本征砷化镓层厚1 μm 。AuGeNi蒸镀在样品的背面,形成欧姆接触。半透明的NiCr蒸镀在超纯本征砷化镓表面,形成肖特基势垒;电场通过NiCr和AuGeNi两个电极层,加在超纯本征砷化镓层上。时域太赫兹波谱实验中用到的激光脉冲是由 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$ 锁模激光器发出的半峰全宽(FWHM)约为110 fs的飞秒脉冲。激光脉冲的平均功率约为10 mW,照射到面积约为0.5 mm \times 1 mm的样品上。在这样的激发条件下,激发的电子密度很低,保持在约 $5\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$,能有效地避免因为空穴堆积引起的场屏蔽效应。飞秒激光脉冲的光子能量在10 K下为1.515 eV,使得电子被激发在导带的底部(空穴被激发在价带的顶部)。从样品中辐射出的太赫兹电磁场的时域波形通过电光取样的方法记录下来。使用100 μm 厚的ZnTe晶体作为探测器,其响应频谱范围约为0~4 THz^[18~20]。通过测量样品的电流/电压(I-V)曲线,可以推算出样品本身的肖特基势垒的高度约为0.74 eV(10 K),从而准确地估算出样品的内建电场(内建电场强度为样品本身的肖特基势垒所产生的电场和外加电场的总和)。另外,由于砷化镓中空穴的有效质量远大于电子,可认为空穴相对于电子来说几乎是静止的,所探测到的太赫兹电磁场信号是由电子的加速、减速运动单方面引起的。

具体的实验装置如图1所示(时域太赫兹波谱

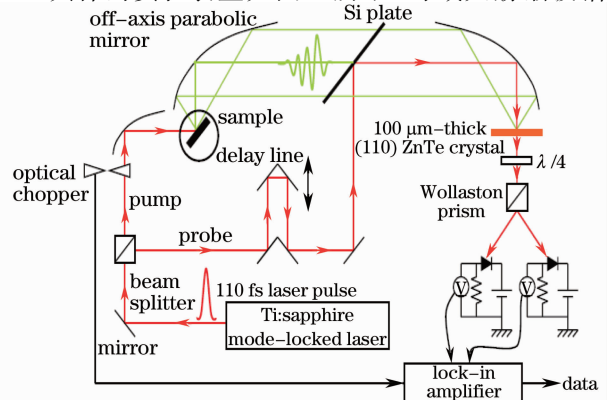


图1 时域太赫兹波谱系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of time-domain terahertz spectroscopy system

系统)。110 fs 左右的激光脉冲被分束镜分成抽运光和探测光。抽运光照射到砷化镓样品上,激发出超纯本征砷化镓层中的电子-空穴对。电子-空穴对经电场加速,向空间辐射出电磁波。空间电磁波被收集,和探测光一起聚焦在 ZnTe 电光晶体上。运用电光取样技术,探测空间电磁波 E_{THz} ,从而得到电子的动态运动信息(加速度、减速度)。

3 实验结果与讨论

图 2 为 10 K 时,在不同电场 F 下,从样品中辐射出的太赫兹电磁波。如图 2 所示, $E_{\text{THz}}(t)$ 表现出双极特性:一个初始的正峰值和随后的负谷值。这个特性是非平衡载流子的过热效应造成的^[13~16]。

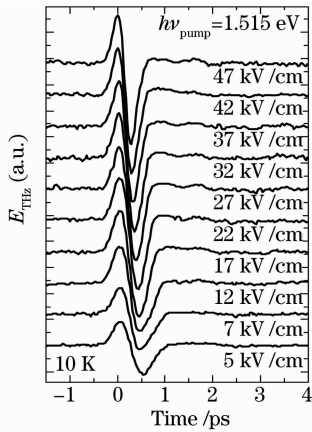


图 2 10 K 时,不同电场 F 下从样品中辐射出的太赫兹电磁场的时域波形

Fig. 2 Temporal waveforms of THz electric field (E_{THz}) emitted from m-i-n diodes with a $1 \mu\text{m}$ -thick intrinsic GaAs layer, measured for various bias electric fields at 10 K

从麦克斯韦方程可知,样品中所辐射出的太赫兹电磁波和电子的加速度/减速度成正比,即

$$E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 v 为非平衡载流子的瞬时速度。可认为初始的 $E_{\text{THz}}(t)$ 正峰值是由电子在 Γ 谷中的加速引起的,而随后的负谷值源于电子从 Γ 谷到 L 谷的谷间散射。

时域太赫兹波谱测量的本质是测量电子系统在阶跃电场下的响应^[17,18]。注意到这一重要信息,就能得到在阶跃电场作用下的电子系统的太赫兹功耗谱^[19]。

图 3 为从图 2 中所示的实际测量的时域太赫兹波计算出的傅里叶变换谱 $E_{\text{THz}}(\omega)$ 。图 3 可知,实部 $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ 在低频区域为负值,在高频部分又变为

正值。还要指出随着电场强度 F 的增大,整个谱形向高频部分移动。随着 F 的增大, $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ 的负值区域可持续到约 750 GHz。这表明由于电子谷间散射引起的太赫兹增益范围在超高电场下可持续到约 750 GHz,远大于蒙特卡罗模拟的预测。在 300 K 温度下,也观察到类似的结果。

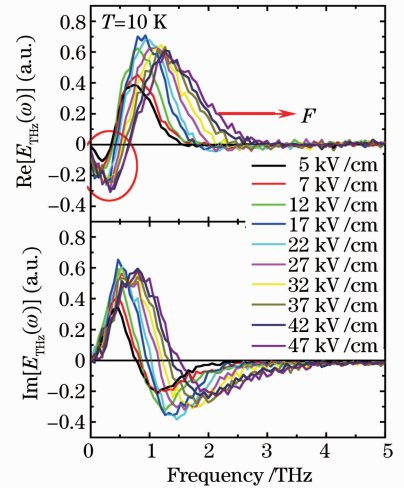


图 3 10 K 时,在不同电场 F 下得到的从样品中辐射出的 $E_{\text{THz}}(t)$ 的傅里叶变换谱的实部 $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ 和虚部 $\text{Im}[E_{\text{THz}}(\omega)]$

Fig. 3 Real and imaginary parts of the Fourier spectra of $E_{\text{THz}}(t)$, $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ and $\text{Im}[E_{\text{THz}}(\omega)]$, obtained from sample for various F at 10 K

最后,讨论制约增益极限频率 ν_c 的物理本质。图 4 为增益的极限频率和温度的关系。发现在不同的电场情况下, ν_c 都随着温度的增长而增长。

电子在 Γ 谷中经由纵光学声子辐射所发生的散射,其弛豫时间可表示为

$$\frac{1}{\tau_{(e)}(\mathbf{k})} = \frac{2\pi}{\hbar} \int_0^{+\infty} \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{e^2 \hbar \omega_{\text{LO}}}{2\epsilon_0} \langle N_{\text{LO}} + 1 \rangle \times \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_r} \right) \frac{1}{|\mathbf{k}' - \mathbf{k}|^2} \delta[\epsilon(\hat{\mathbf{k}}') - \epsilon(\hat{\mathbf{k}}) + \hbar \omega_{\text{LO}}] d^3 \mathbf{k}', \quad (2)$$

式中 $\hbar = h/2\pi$ (h 为普朗克常量), ω_{LO} 为纵光学声子的频率, ϵ_0 是真空中介电常数, ϵ_r 是静态介电常数, ϵ_∞ 是高频介电常数, $\hat{\mathbf{k}}$ 和 $\hat{\mathbf{k}}'$ 是散射前后的电子的波矢。在(2)式中,纵光学声子的玻色-爱因斯坦因子 $\langle N_{\text{LO}} \rangle$ 可以表示为

$$\langle N_{\text{LO}} \rangle = \frac{1}{\exp(\hbar \omega_{\text{LO}}/k_B T) - 1}, \quad (3)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为晶格的温度。从图 4 中发现增益的极限频率 ν_c 随着温度的增长趋势和纵光学声子的辐射率 $\langle N_{\text{LO}} + 1 \rangle$ 基本一致(如虚线所示)。这一结

论强烈地暗示了电子因谷间散射而产生的增益的极限频率是由纵光学声子从 L 谷到 Γ 谷的散射能量弛豫过程所需要的时间决定的,这一实验结论和过去 40 年来使用蒙特卡罗模拟的结果是一致的^[20,21]。

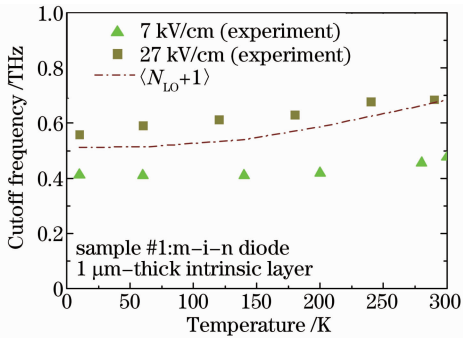


图 4 在电场强度为 7 和 27 kV/cm 的情况下, $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ 的负值部分的截止频率和温度的关系, 虚线为 $\langle N_{LO} + 1 \rangle$ 和温度的关系

Fig. 4 Cutoff frequencies for negative $\text{Re}[E_{\text{THz}}(\omega)]$ are plotted as a function of temperature for 7 kV/cm (triangles) and 27 kV/cm (squares). The dashed line shows the temperature dependence of $\langle N_{LO} + 1 \rangle$

在低温情况下, 如 (3) 式所示, 纵光学声子辐射率 $\langle N_{LO} + 1 \rangle$ 将会比高温时候低很多, 所以预计电子会在 Γ 谷中有更长的弛豫时间, 从而造成了 10 K 下增益的极限频率将会比 300 K 时的低。这一预期结论和图 4 中的实验结论符合得非常好。

4 结 论

利用自由空间太赫兹电光取样方法, 测量了在高电场下, 砷化镓中受飞秒激光脉冲激发的电子所辐射出的太赫兹波。发现从样品中辐射出的太赫兹电磁波表现出双极特性。这是由于高电场下, 砷化镓中的电子谷间散射造成的。此外, 通过计算在不同电场下的太赫兹波的傅里叶变换谱, 实验观察到了阶跃输入电场下的电子的太赫兹功耗谱。发现因砷化镓内电子谷间散射而引起的增益极限频率在 10 K 下可达到约 750 GHz。此截止频率远大于蒙特卡罗模拟的预测。同时通过测量极限频率和温度的关系, 发现极限频率由电子经由纵光学声子从 L 谷到 Γ 谷的散射能量弛豫过程所需要的时间决定的。通过理论计算电子在 Γ 谷的弹道加速、电子谷间散射和电子经由纵光学声子连续散射在 Γ 谷的弛豫等过程的时间得出的增益极限频率与实验值吻合得较好。

参 考 文 献

- B. K. Ridley, T. B. Watkins. The possibility of negative resistance effects in semiconductors[J]. *Proc. Phys. Soc. Lon.*, 1961, **78**(2): 293~304
- C. Hilsum. Transferred electron amplifiers and oscillators[J]. *Proc. IRE*, 1962, **50**(2): 185~189
- J. B. Gunn. Microwave oscillations of current in III-V semiconductors[J]. *Solid State Commun.*, 1993, **88**(11-12): 883~886
- H. Kroemer. Theory of Gunn effect[J]. *Proc. IEEE*, 1964, **52**(12): 1736
- A. Reklaitis, L. Reggiani. Monte Carlo study of hot-carrier transport in bulk wurtzite GaN and modeling of a near-terahertz impact avalanche transit time diode[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(12): 7925~7935
- V. Gruzinskis, E. Starikov, P. Shiktorov *et al.*. Hydrodynamic analysis of DC and AC hot-carrier transport in semiconductors[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**(7): 1283~1290
- Y. K. Pozhela, L. Reggiani. Hot Electron Transport in Semiconductors[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1985
- Tian Zhen, Wang Changlei, Li Yanfeng *et al.*. Compact THz time-domain spectroscopy based on photonic crystal fiber femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 477
- 田震, 王昌雷, 栗岩峰等. 基于光子晶体光纤飞秒激光器的紧凑型太赫兹时域光谱仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 477
- Zheng Fanghua, Liu Huan, Li Xifu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd: YAG laser for terahertz wave source[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 200~205
- 郑芳华, 刘欢, 李喜福等. 产生太赫兹辐射源的 Nd: YAG 双波长连续激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 200~205
- Zhang Xingning, Chen Ji, Zhou Zekui. THz time-domain spectroscopy technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 35~38
- 张兴宁, 陈稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(7): 35~38
- Ma Chengju, Chen Yanwei, Xiang Jun *et al.*. Progress in generation of terahertz radiation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 56~61
- 马成举, 陈延伟, 向军等. 太赫兹辐射产生技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4): 56~61
- Zhang Yinghua, Liu Yupu, Lu Peihua *et al.*. Picosecond electro-optic sampling[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(3): 176~179
- 张影华, 刘玉璞, 陆培华等. ps 超高速电光采样[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(3): 176~179
- A. Leitenstorfer, S. Hunsche, J. Shah *et al.*. Femtosecond charge transport in polar semiconductors[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(25): 5140~5143
- A. Leitenstorfer, S. Hunsche, J. Shah *et al.*. Femtosecond high-field transport in compound semiconductors[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(24): 16642~16652
- Y. M. Zhu, T. Unuma, K. Shibata *et al.*. Femtosecond acceleration of electrons under high electric field in bulk GaAs investigated by time-domain terahertz spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(4): 042116
- Zhu Yiming, Zhang Dawei, He Boyong *et al.*. Strong band mixing in bulk GaAs under high electric field investigated by time-domain terahertz spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 328~332
- 朱亦鸣, 张大伟, 何波涌等. 利用时域太赫兹波谱法的超高电场下砷化镓内能带耦合现象研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 328~332

17 Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnoblioudov *et al.*. Terahertz conductivity and possible Bloch gain in semiconductor superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(4): 046806

18 N. Sekine, K. Hirakawa. Dispersive terahertz gain of a nonclassical oscillator: Bloch oscillation in semiconductor superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5): 057408

19 Zhu Yiming, Jia Xiaoxuan, Chen Lin *et al.*. Terahertz power dissipation spectra of electrons in bulk GaAs under high electric fields at low temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4):

2692~2696

朱亦鸣,贾晓轩,陈 麟等. 超低温高电场下 GaAs 的电子太赫兹功耗谱的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2692~2696

20 P. Das, R. Bharat. Hot electron relaxation times in two-valley semiconductors and their effect on bulk-microwave oscillators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(12): 386~388

21 P. J. Bulman, G. S. Hobson, B. C. Taylor. *Transferred Electron Devices*[M]. London and New York: Academic Press, 1972

3 kW 工业用光纤耦合全固态激光器

全固态激光器具有效率高、稳定性高、光束质量好、体积小、寿命长等一系列优点,是军事、工业、医学和科研等领域的新一代理想光源。大功率全固态激光器技术不仅在先进制造等工业加工上有重要的应用,同时也是对武器装备性能影响巨大的关键技术之一。目前我国千瓦级以上的工业化全固态激光器主要依赖于进口,价格昂贵且售后服务滞后,使工业化

应用受到很大限制,极大地制约了我国先进制造业的发展。中国科学院半导体研究所全固态光源实验室研制了 3 千瓦级光纤耦合的全固态激光器,激光器采用主振荡-功率放大(MOPA)结构,连续运转,激光波长为 1064 nm,通过芯径 400 μm 、数值孔径(NA)0.2 的光纤输出,如图 1 所示。

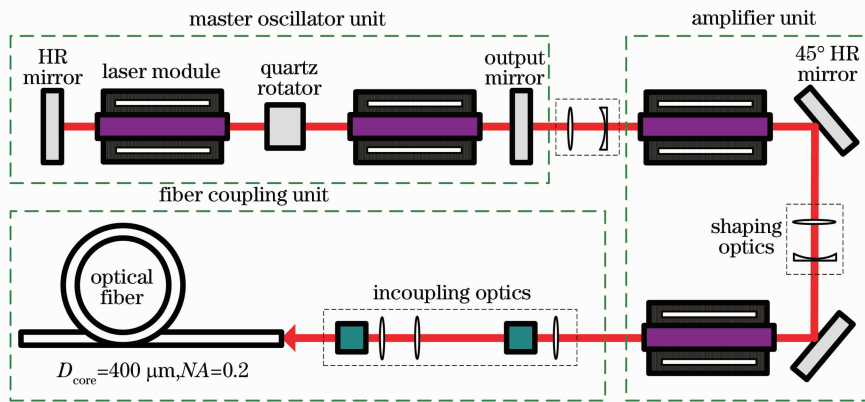


图 1 3 kW 工业用光纤耦合全固态激光器结构

Fig. 1 Scheme of 3 kW industrial fiber-coupled solid-state laser

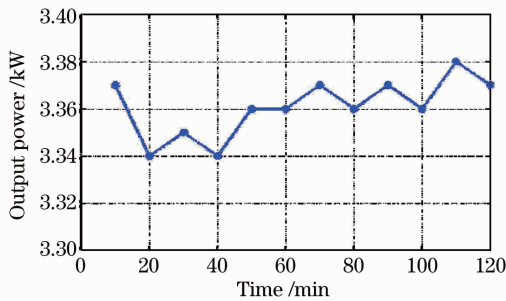


图 2 3 kW 工业用全固态激光器功率稳定性曲线
Fig. 2 Output power stability of 3 kW industrial fiber-coupled solid-state laser

经专家测试,激光器连续运转 2 h 输出的平均功率为 3.36 kW,功率不稳定性为 $\pm 0.6\%$,如图 2 所示。该激光器已集成于工业焊接加工装备中,集成前激光器进行连续 8 h 稳定性测试,无异常。目前,该套装备已初步应用于 5 mm 钢板的焊接。

赵鹏飞 侯 玮 林学春 农光壹 吉俊文
李 达 刘燕楠 李晋闽
(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室,
北京 100083)