

LT-GaAs 飞秒光电导特性*

郭冰 文锦辉 张海潮 廖睿 赖天树 林位株

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 物理系, 广州, 510275)

摘要 采用飞秒脉冲光电探测技术研究低温生长砷化镓光电导开关超快瞬态响应特性. 实验测得不同激发波长的偏置电压下 LT-GaAs 光电导开关瞬态响应弛豫时间约 350~390fs, 由实验数据计算得到电子迁移率约 $1000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 由导出的瞬态光电流相关响应归一化表达式, 对实验曲线进行数据拟合, 结果与实验曲线吻合.

关键词 飞秒激光, LT-GaAs, 超快光电导开关.

FEMTOSECOND PHOTO-CONDUCTIVE CHARACTERISTICS OF LT-GaAs[†]

GUO Bing WEN Jin-Hui ZHANG Hai-Chao

LIAO Rui LAI Tian-Shu LIN Wei-Zhu

(The State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Department of Physics,
Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract The ultrafast photo-conductive characteristics of LT-GaAs were studied with femtosecond photocurrent correlation measurements. A response time ranging from 350 to 390 fs of a LT-GaAs micro-coplanar-strip-lines gap for different exciting photon energies and different bias voltages was obtained. It has been estimated that the transport rate of the photo-excited electrons in the gap is $1000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. The experimental traces are well consistent with a theoretical normalized transient photo-current correlation function.

Key words femtosecond laser, LT-GaAs, ultrafast photo-conductive switch

引言

在半导体超快光电导开关器件的研究中, 光电导的瞬态响应特性是人们感兴趣和关注的课题, 光电导取样或外光电晶体取样是目前表征光电导开关瞬态响应特性使用最为广泛的技术^[1~4]. 通常采用双光电导同步相关取样方法测量光电导开关瞬态响应特性^[5,6]. 若在常用的飞秒光脉冲泵浦探测相关测量技术中, 通过测量单个光电导开关对两列相关的泵浦光与探测脉冲序列非线性光电流响应, 既可实现光电导开关瞬态响应速度的原位电相关探测, 又避免了双光电导取样探测中微传输线色散和损耗引起的信号波形畸变, 使系统测量精度和灵敏度提高, 从而得到更为真实的光电导瞬态光电流的时间弛豫特性^[7-8].

本工作采用双光束泵浦探测原位相关测量方法, 并利用自建的自锁模钛宝石飞秒激光系统和半导体超快光电探测系统对低温生长砷化镓(简称 LT-GaAs)光电导开关超快瞬态响应特性进行理论与实验研究.

1 样品和实验

LT-GaAs 光电导开关是在 $1\mu\text{m}$ 厚的 LT-GaAs 薄膜上制成的. LT-GaAs 薄膜用分子束外延 (MBE) 法在 200C 下生长于半绝缘砷化镓衬底上, 并在 600C 富含 As 气氛中退火 10min. 在 LT-GaAs 薄膜衬底表面真空蒸镀 $0.1\mu\text{m}$ Cr 粘附层和 $0.2\mu\text{m}$ Au 电极层后, 经光刻得到所需共面微带线型光电导开关样品. 用作开关电极的中心主传输线宽 $30\mu\text{m}$, 它与两侧接地面相距 $20\mu\text{m}$, 光电导开关键缝

* 国家自然科学基金(编号 19874082)和广东省自然科学基金(编号 980368)资助项目
稿件收到日期 2000-10-12, 修改稿收到日期 2000-12-11

† The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19874052) and Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (No. 980368)
Received 2000-10-12, revised 2000-12-11

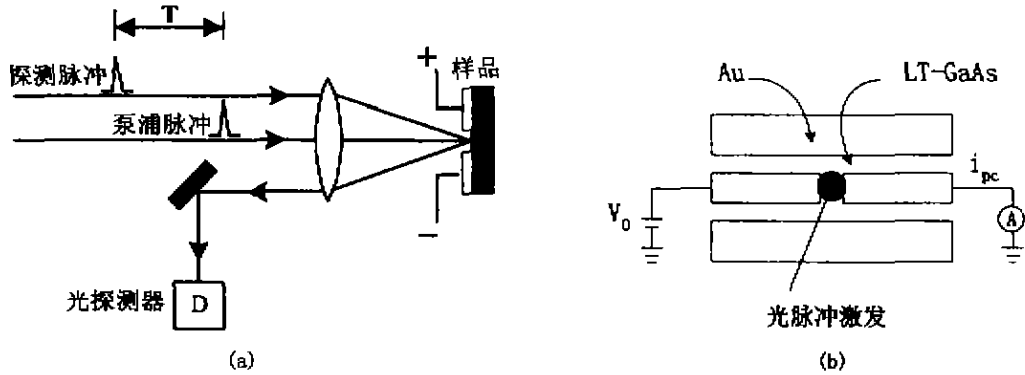


图1 (a) LT-GaAs 光电导开关瞬态响应相关测量示意图, (b) 光电导开关结构与电路连接示意图
Fig. 1 (a) Measurement setup of the transient response of the LT-GaAs photoconductive switch,
(b) configuration and circuit of the photoconductive switch

隙尺寸为 $10 \times 30 \mu\text{m}$, 如图 1(b)。由保角变换^[9]可计算得到两微带电极阻抗约为 50Ω , 总的微带线阻抗为两者之和, 即 $Z_0 \approx 100 \Omega$ 。

采用非共线飞秒脉冲光泵浦-探测技术测量 LT-GaAs 光电导开关瞬态电流响应, 参见图 1(a)。自锁模钛宝石激光器输出的飞秒光脉冲序列经一类迈克尔逊干涉仪的光学延迟线分为泵浦和探测光脉冲序列, 由透镜将泵浦-探测光聚焦在共同激发光电导开关缝隙有源区, 实现光电导开关瞬态响应原位电相关测量^[7]。通过微带电极给 LT-GaAs 光电导开关加一正向直流偏置电压 V_0 , 在光脉冲作用下, 光激发载流子使 LT-GaAs 电导率增大, 开关由无光照射时的高阻态 ($\rho \geq 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) 变为低阻态, 开关导通, 对外电路输出瞬时电流脉冲, 此瞬态光电流信号经由外电路积分后输入到锁相放大器检测。

另一方面, 采用相对较强的泵浦光脉冲激发样品时, 受激产生于导带中的电子和价带中的空穴布居会降低样品对同步到达的探测光的吸收, 产生瞬态吸收饱和效应。由 Kramers-Kronig 关系可知, 样品表面反射率亦产生相应的调制, 随着受激载流子 (电子和空穴) 布居的衰减, 这种饱和效应便随之退化, 样品表面反射率随之恢复, 因此飞秒瞬态饱和和反射谱可用于受激载流子超快驰豫动力学的研究, 是测量受激载流子寿命的有效手段^[10]。采用飞秒光脉冲泵浦探测技术, 用一光探测器接收经样品表面反射后的探测光信号, 再输入到锁相放大器即可测得 LT-GaAs 瞬态反射信号, 由这一信号可以分析开关缝隙区受激载流子超快驰豫特性。

2 结果与分析

LT-GaAs 光电导开关瞬态光电流响应相关测量

结果(归一化)如图 2 实线所示。自锁模钛宝石飞秒激光器输出光脉冲宽度约 60fs , 重复率为 96MHz , 总的平均输出功率约 200mW , 泵浦光和探测光偏振方向相互平行, 强度比为 $4:1$ 。聚焦透镜为石英透镜, 焦距 50mm , 光斑聚焦半径约 $10 \mu\text{m}$ 。图 2(a)~(c) 对应的激发光波长分别为 810 、 784 和 810nm , 正向直流偏置电压分别为 35 、 35 和 75V , 所用激发光功率相同, 泵浦光和探测光平均功率分别衰减至 0.4 和 0.1mW , 对应的泵浦光脉冲与探测光峰值光强约等于 1.44×10^7 和 $3.6 \times 10^6 \text{W/cm}^2$, 测得的峰值光电流 (扣除背景后) 分别为 0.03 、 0.032 和 $0.25 \mu\text{A}$ 。图 2 曲线(d)是(c)在时基上的扩展, 即(d)是(c)尖峰的放大, 代表泵浦-探测光脉冲对相干作用产生的影响。由图 2 可见, LT-GaAs 光电导开关瞬态光电流响应相关曲线以时间延迟零点为中心左右对称, 在延时零点附近, 较宽的包络上叠加了一个很窄的尖峰。改变激发光波长和偏置电压对削减峰的半高全宽 (FWHM) 无明显影响 ($\approx 90 \text{fs}$), 但从图 2(a)~(c) 可知, 尖峰部分在总的瞬态光电流响应相关信号中所占比例略有增加, 而实验曲线(a)~(c) 慢变部分的驰豫则略微减慢, 实验测得慢变部分的驰豫时间分别约为 350 、 375 和 390fs 。此外, 在实验曲线(a)和(b)中, 零点附近的尖峰向两侧宽包络慢变部分过渡时存在明显的转折。

光电导开关可等效为一个由微带线阻抗 Z_0 和瞬态光电导 $g(t)$ 相串联的宏观电路元件, 其瞬态光电流响应 $i_{pc}(t)$ 可表示为^[7]

$$i_{pc}(t) = \frac{V_0}{Z_0 + g^{-1}(t)}, \quad (1)$$

将式(1)泰勒展开, 并保留到二阶项, 则

$$i_{pc}(t) = \frac{V_0}{Z_0} [Z_0 g(t) - Z_0^2 g^2(t)], \quad (2)$$

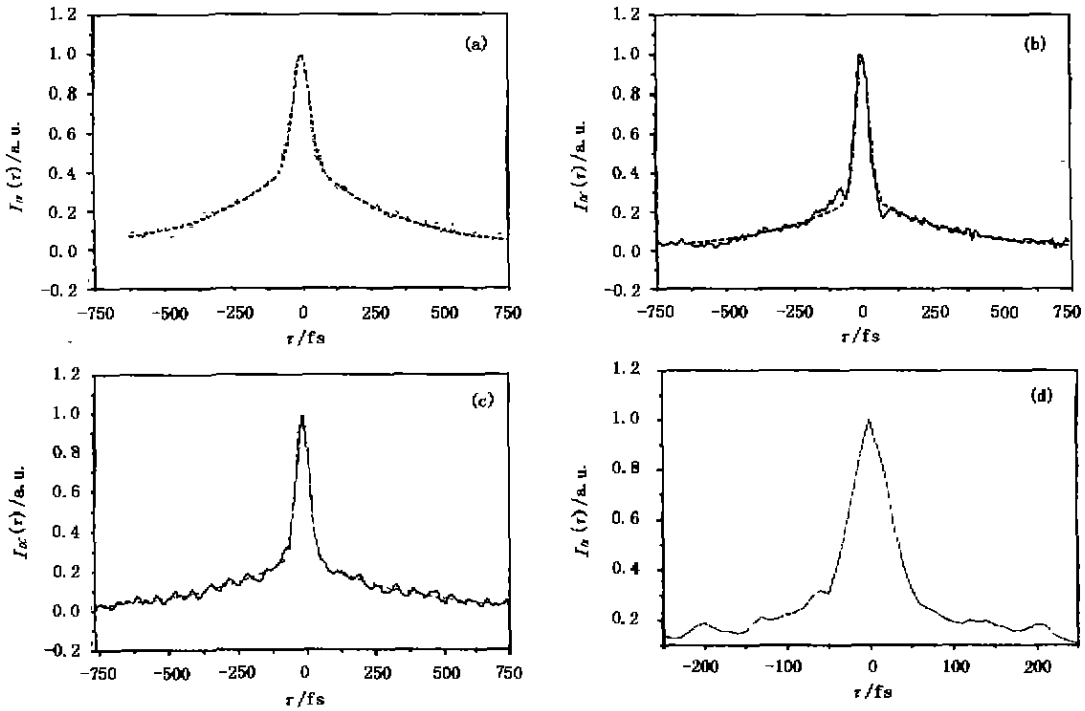


图 2 LT-GaAs 光电导开关瞬态光电流相关响应(归一化),实线为实验曲线,虚线为拟合曲线 (a)~(c)对应的激发光波长分别为 810nm,784nm 和 810nm,偏置电压分别为 35,35,75V,拟合参数为 (a) $\delta=0.5, \tau_d=350\text{fs}$, (b) $\delta=0.7, \tau_d=375\text{fs}$, (c) $\delta=0.75, \tau_d=390\text{fs}$, (d)是(c)中尖峰的放大
Fig. 2 Experimental (solid) and theoretical (dashed) fitting traces of the normalized transient response correlation of the LT-GaAs photoconducting switch. Traces (a) to (c) are obtained under varied exciting laser wavelengths of 810nm, 784nm and 810nm with field bias 35V, 35V and 75V, respectively. The fitting parameters are (a) $\delta=0.5, \tau_d=350\text{fs}$, (b) $\delta=0.7, \tau_d=375\text{fs}$, (c) $\delta=0.75, \tau_d=390\text{fs}$. (d) enlargement of the peak of (c)

式(2)中括号里第一项为线性响应,第二项为二阶非线性响应,而瞬变光电导响应 $g(t)$ 是激发光脉冲和光生载流子驰豫过程的卷积^[11],即

$$g(t) = k \cdot \int_{-\infty}^t dt' I(t') e^{-\alpha(t-t')/\tau_R} \quad (3)$$

式(3)中 $k = k_0 \cdot e\mu \cdot \eta a / h\omega$, k_0 为开关宽度与长度之比, $\eta, a, h\omega, e, \mu, \tau_R$ 分别表示外部量子效率、样品光吸收率、光子能量、电子电荷、迁移率和自由载流子寿命. 平行偏振且相对延时为 τ 的泵浦光 $I_1(t)$ 和探测光 $I_2(t-\tau)$ 空间重叠共同激发光电导开关时, 因光场干涉作用, 总的激发光强 $I(t, \tau) = I_1(t) + I_2(t-\tau) + 2 \cdot \sqrt{I_1(t)I_2(t-\tau)}$. 由式(2)和(3)可得到光电导开关对 $I(t, \tau)$ 的瞬态光电流响应. 相关测量得到的实际上是时间平均光电流信号, 它是相对延时 τ 的函数, 即

$$\langle i_{pc}(\tau) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\tau_{i2}}^{\tau_{i1}} dt \cdot i_{pc}(t, \tau) \quad (4)$$

假设光脉冲为高斯型即 $I(t) = I_0 / \sqrt{\pi\tau_c} \cdot e^{-(t/\tau_c)^2}$, 积分时振幅近似为 δ 函数, 光电导驰豫为单指数形式 $g(t) = g_0 \cdot e^{-t/\tau_d}$, 光电导开关因延迟线快扫描只响应光脉冲时间包络, 电极接触为欧姆接触, 空穴的驰豫与电子相比很慢且迁移率较小, 因而它对光电流的贡献可忽略^[13]. 仅考虑电子对光电流的贡献. 定义光电导响应归一化相关函数为

$$G(\tau) = \frac{\langle i_{pc}(\tau) \rangle - \langle i_{pc}(\infty) \rangle}{\langle i_{pc}(0) \rangle - \langle i_{pc}(\infty) \rangle}$$

令 $I_{10}/I_{20} = \gamma, k_0 = \sqrt{\pi} Z_0 \tau_G k I_{20}, j_{12}(\tau) = e^{-(\tau/\tau_c)^2}$, 则有

$$G(\tau) = \frac{k_0 [2 \sqrt{\gamma} j_{12}^2(\tau) + \sqrt{\gamma} e^{-\tau/\tau_d} + 2(1+\gamma)j_{12}(\tau) - j_{12}(\tau)]}{k_0 [2 \sqrt{\gamma} + 2(1+\gamma)] - 1} \quad (5)$$

利用图 2(a) 对应的实验条件和测量结果: $V_0 = 35\text{V}, \gamma = 4, h\omega \approx 1.55\text{eV}, I_{20} = 3.6 \times 10^6 \text{W/cm}^2, \tau_G \approx 60\text{fs}$, 样品参数 $W = 30\mu\text{m}, L = 10\mu\text{m}, Z_0 = 100\Omega$, 取 $\eta = 50\%, \alpha = 0.5, k_0 \approx 0.1$, 光电流信号重复率近似

等于光脉冲重复率即 $\tau_m \approx 10\text{ns}$, 由时间延迟零点对应的峰值光电流计得 $\mu_c \approx 1000\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. 将这些数值代入式(5), 得

$$G(\tau) \approx \frac{1}{2} j_{12}^2(\tau) + \frac{1}{3} e^{-|\tau/\tau_c|}. \quad (6)$$

由式(6)可知, 光电流响应相关曲线中的尖峰源于偏振相互平行的泵浦-探测光脉冲对相干引起的瞬态

光电流响应即 $j_{12}^2(\tau)$ 项, 其半高宽 $\sqrt{2\tau_p} \approx 85\text{fs}$, 实测值为 90fs , 与此相符, $e^{-|\tau/\tau_c|}$ 则代表光电流弛豫项. 假定光场相干产生的响应实际所占百分比为 δ , 按 $G(\tau) \approx \delta j_{12}^2(\tau) + (1-\delta)e^{-|\tau/\tau_c|}$ 对实验曲线进行数据拟合, 结果如图3中虚线. 拟合时光电流弛豫时间依图2(a)~(c)分别取 $\tau_c = 350, 375$ 和 390fs , 而对应的 δ 值分别为 $\delta = 0.5, 0.7$ 和 0.75 . 由图2可见, 拟合结果与实验曲线吻合得较好.

为了认识光电流弛豫机制, 我们测量了开关源区 LT-GaAs 光电导薄膜层瞬态反射谱, 结果如图3. 偏置电压分别为 $V_b = 0$ (虚线) 和 $V_b = 30\text{V}$ (实线), 激发光波长约 790nm , 泵浦光平均功率约 10mW , 受激载流子浓度约 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$. 由于激发后过超能量主要集中于导带电子, 价带空穴的能量弛豫非常快, 因而导带电子对 LT-GaAs 样品吸收的变化占主导, 空穴的影响可以忽略. 由图3可见, 受激产生于导带的自由电子的弛豫包含有较快和较慢两个过程, 将相关耦合假象从测得的反射谱曲线中扣除和进行双指数拟合^[13], 得到弛豫过程快成分与慢成分的时间常数分别为 $t_1 = 80\text{fs}$ 和 $t_2 = 320\text{fs}$ ($V_b = 0$) 或 $t_2 = 400\text{fs}$ ($V_b = 30\text{V}$). t_1 代表载流子初始散

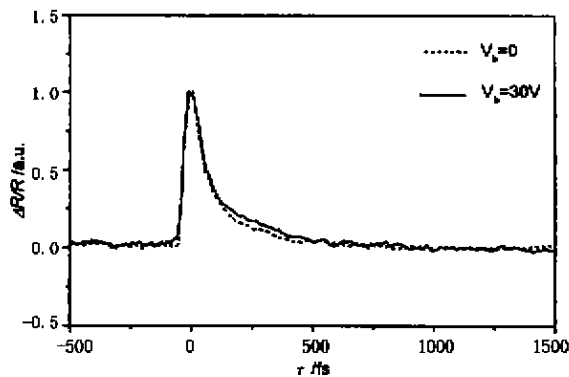


图3 不同偏置电压下的 LT-GaAs 瞬态反射谱, 实线和虚线分别对应偏置电压 30V 和无偏压的情形
Fig. 3 The transient reflection traces of LT-GaAs under varied field bias; the solid and dashed curves correspond to 30V and 0V bias, respectively

射时间, t_2 为光生载流子寿命, 它取决于 LT-GaAs 中缺陷态的捕获速率^[11,14]. 测量结果显示有外电场时载流子寿命增长, 这是由于外电场使电子加热, 捕获速率减少之故^[11]. 这一结果和光电导测量结果基本一致.

3 讨论

光生自由载流子寿命是决定光电导开关响应速度的关键, 而微带线电路时间常数通过合理设计可快至几十飞秒(我们所用共面微带线电路时间常数仅 50fs ^[14], 如图1(b)), 因此它对开关响应速度的影响较小. 低温生长引入到 LT-GaAs 中的高密度深能级缺陷使导带自由电子被快速捕获^[10], 因而光生电子有短至亚皮秒的寿命, 从而使得 LT-GaAs 光电导开关具有亚皮秒响应速度.

总之, 我们采用光电混合飞秒泵浦-探测技术就 LT-GaAs 光电导开关超快瞬态响应特性进行了理论分析与实验研究, 推导出瞬态光电流相关响应归一化表达式, 实验测得不同激发波长或偏置电压下 LT-GaAs 光电导开关瞬态响应弛豫时间约 $350 \sim 390\text{fs}$, 由实验数据计算得到电子迁移率约 $1000\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. 由导出的瞬态光电流相关响应归一化表达式, 利用飞秒瞬态反射谱测得 LT-GaAs 光生电子寿命(约 320fs), 对实验曲线进行数据拟合, 结果与实验曲线吻合得较好.

REFERENCES

- [1] Verghese S, Zamdmer N, Hu Q. Cryogenic picosecond sampling using fiber-coupled photoconductive switches. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**: 2493
- [2] Zamdmer N, Hu Q, Verghese S, et al. Mode-discriminating photoconductor and coplanar waveguide circuit for picosecond sampling. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 1039
- [3] Zhou X, Alexandrou S, Hsiang T Y. Monte Carlo investigation of the intrinsic mechanism of subpicosecond pulse generation by nonuniform illumination. *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**: 706
- [4] Lin G R, Pan C L. Picosecond response of low-dosage arsenic-implanted GaAs photoconductors. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 2901
- [5] Frankel M Y, Gupta S, Valdmanis J A, et al. Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1991, **39**: 910
- [6] WANG Yun-Cai, HE Xiao-Hong, CHEN Guo-Fu, et al. The measurement technology of ultrafast optoelectronics. *Progress in Physics* (王云才, 贺晓宏, 陈国夫, 等. 超快光电测量技术. 物理学进展), 1998, **18**: 308

- [7] Vergbese S, Zamdmer N, Hu Q. An optical correlator using a low-temperature-grown GaAs photoconductor. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**: 842
- [8] Zamdmer N, Hu Q, McIntosh K A, *et al.* Increase in response time of low-temperature-grown GaAs photoconductive switches at high voltage bias. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**: 2313
- [9] GUO Bing, WEN Jin-Hui, ZHANG Hai-Chao, *et al.* Terahertz dispersion and attenuation characteristics of optically excited coplanar stripes on LT-GaAs. *J. Infrared Millim. Waves* (郭 冰, 文锦辉, 张海潮, 等. 光激发共面 ZLT-GaAs 微带传输线 THz 色散与衰减特性. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(2): 98
- [10] Gupta S, Frankel M Y, Valdmanis J A, *et al.* Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 3276
- [11] Weling A S, Heinz T F. Enhancement in the spectral irradiance of photoconducting terahertz emitters by chirped-pulse mixing. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1999, **16**: 1455
- [12] Stellmacher M, Sebnell J P, Adam D, *et al.* Photoconductivity investigation of the electron dynamics in GaAs grown at low temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 1239
- [13] LIN Wei-Zhu, QIU Zhi-Ren, XU Wen-Cheng. Femtosecond relaxation of excited carriers in AlGaAs/GaAs multiple quantum wells. *Acta Optica Sinica* (林位株, 丘志仁, 徐文成. AlGaAs/GaAs 多量子阱结构中受激载流子的飞秒驰豫特性. *光学学报*), 1992, **12**: 390
- [14] WEN Jin-Hui, CHEN Ying-Yu, HUANG Chun, *et al.* Ultrafast carrier dynamics of low-temperature grown GaAs. *J. Infrared Millim. Waves* (文锦辉, 陈颖宇, 黄淳, 等. 低温生长 GaAs 非平衡载流子的超快动力学特性. *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(3): 195