

GaAs 半导体中三光子吸收的 非线性光电导测量

程 昭 徐大纶 王力鸣* 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术实验室, 陕西, 西安, 710068)

摘要: 采用非线性光电导技术测量 2.06 μm 激光激发的 GaAs 本征半导体三光子吸收, 观察到三光子和单光子吸收的混合光电导, 测得了三光子吸收系数. 测量结果与理论计算符合较好.

关键词: 三光子吸收, 非线性光电导.

引言

多光子吸收过程是一种高阶非线性光学过程, 它不仅与材料损伤阈值密切相关, 而且在固体物理基础研究方面 (例如能带结构信息及超短光脉冲与半导体相互作用过程) 有着重要的意义和应用前景. 对 GaAs 半导体材料中多光子吸收作过的许多工作都局限于 1.06 μm 激光激发下的双光子吸收过程^[1], 而对 GaAs 三光子吸收的实验研究还未见报道.

我们采用非线性光电导 (NLP) 测量技术观测了 2.06 μm 激光照射下 GaAs 本征半导体的非线性电导效应. GaAs 的禁带宽度为 1.43 eV, 使用调 Q YLF 激光, 光子能量为 0.602 eV, 满足三光子吸收条件 $2h\omega < E_g < 3h\omega$. 由此可预计光电导的变化主要为三光子吸收的贡献. 实验测得的三光子吸收系数与二能带理论模型及 Keldysh 理论模型计算的三光子吸收系数符合较好.

1 实验装置与测量方法

测量 GaAs 三光子吸收的 NLP 装置如图 1 所示. 调 Q YLF 激光器产生波长 $\lambda = 2.06 \mu\text{m}$, 激光脉冲宽度 $\tau_L = 80 \text{ ns}$. 该激光脉冲通过滤光片 F 和衰减片 A, 经分束镜 BS 后, 分路由能量计 ED 探测并记录, 主路经透镜 L 聚束照射在 GaAs 样品 S 上. 产生的电流脉冲经 RC 电路积分后形成的电压脉冲显示在示波器 BO 上. 用衰减片 A 改变激光脉冲光强, 测量不同光强下产生的电流脉冲总电荷量.

本文 1991 年 5 月 16 日收到, 修改稿 1991 年 10 月 28 日收到.

* 现在中山大学激光与光谱学研究所, 广东, 广州, 510275.

根据图 1 中的 RC 电路可以得到激光脉冲引起电容 C 的电压的变化量为:

$$\Delta V_c(t) = \frac{V}{C} \exp\left[-\frac{t}{RC}\right] \int_{-\infty}^{\infty} \Delta G(t) dt. \quad (1)$$

这样, 光脉冲所感应的总电荷为

$$Q = \Delta V_{C_{max}} C = V \int_{-\infty}^{\infty} \Delta G(t) dt = VC_0, \quad (2)$$

式 (2) 中 $C_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta G(t) dt$, $\Delta V_{C_{max}}$ 是示波器上的电压脉冲峰值, V 为外加直流电压, $\Delta G(t)$ 是激光脉冲引起的光电导. 从下文的理论分析可知 C_0 是与吸收系数及光强有关的量, 因此通过测量总电荷可得出三光子吸收系数.

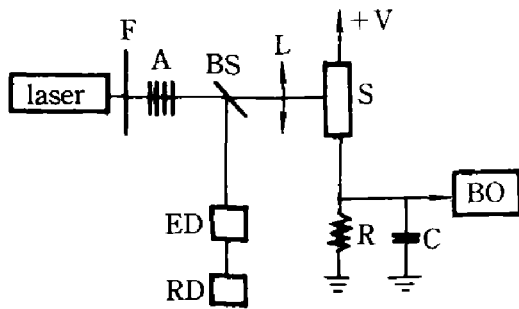


图 1 三光子吸收的 NLP 实验测量装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up for NLP measurement of three-photon absorption

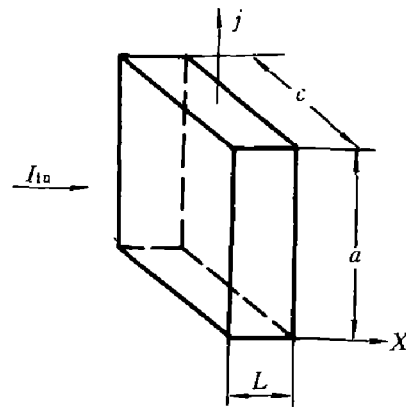


图 2 光电导体示意图
Fig. 2 Schematic of a photoconductor

2 光电导的理论分析

已知载流子浓度 P 随时间的变化服从扩散方程为

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \nabla^2 P - \mu \nabla \cdot (P \vec{E}) + F - \frac{P - P_0}{\tau}, \quad (3)$$

式 (3) 中 D 为扩散系数, μ 为迁移率, \vec{E} 为所加电场, τ 自由载流子寿命, P_0 为平衡时载流子浓度, F 为光照引起单位体积中载流子的产生率. 式 (3) 决定了载流子浓度 P 的空间和时间特性. 如果对任何特定的初始条件和边界条件都能求解方程 (3), 便可得到任意时刻和任意位置 (x, y, z) 的载流子浓度. 但在一般情况下不可能做到这一点, 只能对几种特殊情况求解. Yee^[2]给出了稳态时的方程 (3) 的解. 这里我们就矩形脉冲激发下方程 (3) 的近似解作一说明.

激光脉冲激发下的光电导体如图 2 所示. 假设 y, z 方向浓度均匀分布, 仅考虑 x 方向的浓度扩散. 令 $\Delta P = P - P_0$, 则式 (3) 变为

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial x^2} + F - \frac{\Delta P}{\tau} \quad (4)$$

在三光子吸收的情况下, 由 Beer-Lambert 定律 $\partial I(x)/\partial x = -\alpha_3 I^3(x)$ (α_3 为三光子吸收系数) 及单位体积的跃迁速率 W_3 [3] 可得

$$F = W_3 = \frac{\alpha_3 I^3(x)}{6\hbar\omega} = \frac{\alpha_3 I_0^3 (1-R)^6}{6\hbar\omega [1 + 2\alpha_3 x I_0^2 (1-R)^3]^{3/2}} \quad (5)$$

其中 I_0 为入射光强, R 为样品反射率. 在宽度为 τ_L 的矩形激光脉冲激发下, 有

$$F(x, t) = \begin{cases} F(x), & -\tau_L < t < 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

同时, 由于扩散过程与激发过程相比变化很慢, 在 $-\tau_L < t < 0$ 时, 式 (4) 右边第一项可以忽略, 得到

$$\Delta P(x, t) = \tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t + \tau_L}{\tau}\right) \right] F(x). \quad (7)$$

当 $t > 0$ 时, $F(x, t) = 0$, 考虑到边界条件

$$-D \frac{\partial \Delta P(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -S \Delta P(x, t) \Big|_{x=0} = -S P_0, \quad (8)$$

$$-D \frac{\partial \Delta P(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = S \Delta P(x, t) \Big|_{x=L} = S P_L, \quad (9)$$

(其中 S 为表面复合速率), 可得式 (4) 的解 $\Delta P(x, t)$.

由电导率的定义 $\sigma = P(x, t) e \mu_h + N(x, t) e \mu_e$ (其中 μ_e , μ_h 分别为电子和空穴的迁移率, $N(x, t)$, $P(x, t)$ 分别为电子和空穴的浓度), 假设 $\Delta P(x, t) = \Delta N(x, t)$, 则得到光电导为

$$\Delta G = \int_0^L \Delta \sigma(x) \frac{c}{a} dx = \frac{ce}{a} (\mu_h + \mu_e) \int_0^L \Delta P(x, t) dx. \quad (10)$$

将式 (7) 及 $t > 0$ 时式 (4) 的解 $\Delta P(x, t)$ 代入式 (10), 积分得到

$$\begin{cases} \Delta G(t) = \frac{ce}{a} (\mu_e + \mu_h) \tau (1 - e^{-\frac{-t + \tau_L}{\tau}}) \int_0^L F(x) dx, & (-\tau_L < t < 0), \\ \Delta G(t) = \frac{ce}{a} (\mu_e + \mu_h) \tau (1 - e^{-\frac{-t + \tau_L}{\tau}}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) x \\ \left[1 - \frac{2\xi}{\lambda} \frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}{1 + \xi \operatorname{ctgh}\left(\frac{\lambda}{2}\right) (1 - e^{-t/\tau})} \right] \int_0^L F(x) dx, & (\tau > 0), \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\xi = S \sqrt{\frac{\tau}{D}}$, $\lambda = \frac{L}{\sqrt{\tau D}}$.

3 实验结果与讨论

从 $-\tau_L$ 到 ∞ 对式 (11)、(12) 积分, 并考虑到式 (12) 中括号内的第二项对于 D 和 S 的典型数值^[5]可忽略, 这样可得

$$C_0 = e(\mu_h + \mu_e) \frac{C\tau\tau_L}{a} \int_0^L F(x) dx. \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (2), 在 $2\alpha_3 I_0^3 L(1-R)^2 \ll 1$ 时有

$$Q = \Delta V_{C_{\max}} C = Ve(\mu_h + \mu_e) \tau\tau_L \frac{c}{a} \cdot \frac{\alpha_3 I_0^3 L(1-R)^6}{6\hbar\omega}. \quad (14)$$

式 (14) 表明 Q 与 I_0^3 成正比.

图 3 是我们测得的电荷 Q 随光强 I_0 的变化曲线, 可以看出, 光强小于 $\sim 18 \text{ MW/cm}^2$ 时, 曲线的斜率近似为 1, 表明单光子过程占优势; 当光强大于 $\sim 18 \text{ MW/cm}^2$ 时, 曲线的斜率近似为 3, 表明三光子吸收占优势.



图 3 GaAs 的非线性光电导
Fig. 3 Nonlinear photoconductivity of GaAs

实验中使用 $V = 1100 \text{ V}$, $C = 12.6 \text{ nF}$, $\tau_L = 80 \text{ ns}$, 取 $\mu_h = 400 \text{ cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$ ^[4], $\mu_e = 8500 \text{ cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$, $a = c$, $t = 10^{-8} \text{ s}$ ^[5], $I_0 = 25 \text{ MW/cm}^2$, 从图 3 及式 (14) 得到 $\alpha_3 = 2.83 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{GW}^2$. 这一实验测量结果与用二能带理论模型算得的 $\alpha_3 = 1.79 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{GW}^2$ ^[6] 和文献[7]给出的用 Keldysh 模型计算的 $\alpha_3 = 1.1 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{GW}^2$ 符合较好.

参考文献

- 1 Stewart A F, Bass M. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 1040
- 2 Yee Jick H. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**: 431
- 3 Nathan Vaidya, Guenther A H et al. *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **B2**: 294
- 4 Omar M A. *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*, Massachusetts: Addison-Wesley, 1975, 273
- 5 Yee Jick H. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**: 231
- 6 程昭, 徐大纶等. *光子学报*, 1992, **21**(4)
- 7 Mitra S S, Judell N H K. *Opt. Lett.*, 1982, **7**: 307

NONLINEAR PHOTOCONDUCTIVITY MEASUREMENT OF THREE-PHOTON ABSORPTION IN GaAs

Cheng Zhao, Xu Dalun, Wang Liming*, Hou Xun

(Laboratory for Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: By using nonlinear photoconductivity (NLP) technique, the experimental investigation on three-photon absorption processes in an intrinsic GaAs semiconductor illuminated by a pulsed laser at $2.06\ \mu\text{m}$ is described. Hybrid photoconductivity of three-photon and single photon absorption has been observed. Three-photon absorption coefficient has been measured, and the experimental value is in good agreement with the theoretical results.

Key words: three-photon absorption, nonlinear photoconductivity.

*Institute for Laser and Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China.