

砷化镓中微微秒光脉冲的自透射

马海明 李富铭

复旦大学物理系

1988 年 11 月 14 日收到

本文报道了以 Brewster 角入射的无掺杂半绝缘 GaAs 的 $1\ \mu\text{m}$ 微微秒光脉冲自透射的实验和理论结果。最佳拟合的深能级 EL2 态的密度为 $1.2 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, 双光子吸收系数为 $29\ \text{cm/GW}$, 自由载流子的吸收截面为 $2.7 \times 10^{-17}\ \text{cm}^2$ 。

一、引 言

许多年来,立方氧化物晶体中的光致折射率 (photorefractive) 效应和自由载流子浓度光栅 (free-carrier concentration-grating) 效应一直是人们感兴趣的问题^[1]。由于半绝缘 GaAs 具有深能级电子的单光子跃迁,并与一些近红外光源(如 YAG 激光)的波长相匹配,以及 GaAs 所固有的高电子迁移率等优点,因此近来受到了人们的重视。用连续 YAG 激光对掺 Cr^{3+} 的半绝缘 GaAs 和用脉冲 YAG 激光对无掺杂的半绝缘 GaAs 的研究已有报道^[2,3]。为了深入探讨 GaAs 中光致折射率效应和自由载流子浓度光栅效应所引起的光波耦合与能量转移的机理,需要较精确地测定一些物理参量,例如,深能级 EL2 态的密度和双光子吸收系数等。

微微秒激光自透射的方法是一种测量双光子吸收系数简便而又实效的方法。早在 1978 年, Bosacchi 等人曾用此方法测量了一般掺杂 GaAs 的双光子吸收系数^[4],但没有涉及深能级电子的跃迁问题。Boggess 等人在 1985 年也用此方法测量了无掺杂半绝缘 GaAs 的双光子吸收系数^[5]。以后,未看到新的此类工作的报道。然而,随着人们对半绝缘 GaAs 中光吸收机理的进一步了解, Boggess 等人当时所用的对实验数据拟合的物理方程现在看来已不适用。

本文首先用 $1\ \mu\text{m}$ 的 ps 激光进行了无掺杂半绝缘 GaAs 中自透射的测量,并用新的理论对实验结果进行了拟合,得到有关参量。与以往类似的实验^[4,5]不同,我们的激光不以正入射而以 Brewster 角入射到样品上。采用这种方法的一个主要优点是可以忽略样品后表面的反射。在正入射时,后表面的反射率达 30%。一般几百微米厚的 GaAs 样品对 $1\ \mu\text{m}$ 波长的光吸收较少,所以相当一部分光能量被后表面反射回来。这部分光与后续的光干涉叠加,影响后续光的非线性吸收。并且这部分光能量中的一部分经再反射可以对总的透射光有可达近 10% 的贡献。要从理论上定量考虑这部分光的影响是非常困难的,而它不利于物理参量的精确测量。

二、理 论 模 型

按照现有的观点,无掺杂半绝缘 GaAs 对一个光脉冲的吸收及其内部电子的跃迁可以归纳成下列电子浓度 n , 空穴浓度 p , EL2⁺ 电离态浓度 N^+ 以及入射光强度 I 的一组方程^[3]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \beta I^2 / (2\hbar\omega) + S_e I (N - N^+) / (\hbar\omega), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \beta I^2 / (2\hbar\omega) + S_h N^+ I / (\hbar\omega), \quad (2)$$

$$\frac{\partial N^+}{\partial t} = [S_e (N - N^+) - S_h N^+] I / (\hbar\omega), \quad (3)$$

式中 β 是双光子吸收系数; N 是总的 $EL2$ 缺陷浓度; S_e , S_h 分别是电子从深能级到导带和价带到深能级单光子跃迁截面. $S_h = S_e/2^{[6]}$. 方程(1)等号右边第一与第二两项分别对应电子的双光子跃迁与深能级跃迁.

光场的变化由波动方程描述. 从波动方程作慢变化近似, 略去二阶微商, 可得到这种情况下的光强变化方程为

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I}{\partial t} + \cos\theta \frac{\partial I}{\partial z} = -\beta I^2 - S_e (N - N^+) I - S_h N^+ I - (S_{fe} n + S_{fh} p) I. \quad (4)$$

式中 v 是晶体中的光速; θ 是光在晶体中的传播方向相对样品的法向轴 (z 轴) 之间的夹角. S_{fe} , S_{fh} 是自由电子与自由空穴的吸收截面.

这里, 由于自由载流子浓度导致的折射率的 Drude 变化^[7]很小, 这种变化只有在存在折射率光栅时才对光强有作用, 所以这部分的变化可以忽略. 另外, 由于自由载流子的光吸收总是在载流子浓度很高时, 即双光子吸收为主时才起明显作用, 所以 $n \approx p$. 可以把方程(4)等号右边最后一项近似成常见的形式: $S_{fe} n + S_{fh} p \approx S_{fe} n$. 上述方程组的边界条件与初始条件为

边界条件为 $z = 0$,

$$I(t, x, y, 0) = [F(x, y) / (\sqrt{\pi} t_p)] \exp[-t^2/t_p^2], \quad (5)$$

$$F(x, y) = F_0 \exp[-(x^2 \cos^2 \theta_0 + y^2)/\sigma^2], \quad (6)$$

式中 t_p 是高斯型脉冲的脉宽常数; θ_0 是入射角; σ 是高斯强度分布的入射光的光斑大小常数; F_0 是光斑中心的辐照度, $F_0 = E_0 \cos \theta_0 / (\pi \sigma^2)$, E_0 为入射光脉冲的能量.

初始条件为 $t = -3t_p$,

$$I(-3t_p, x, y, z) = [F(x, y) / (\sqrt{\pi} t_p)] \exp \left[- \left(-3t_p - \frac{z}{v} \right)^2 / t_p^2 \right] \cdot \exp \{ - [S_e (N - N_0^+) + S_h N_0^+] z \}, \quad (7)$$

$$n(-3t_p, x, y, z) = p(-3t_p, x, y, z) = 0, \quad (8)$$

$$N^+(-3t_p, x, y, z) = N_0^+, \quad (9)$$

式中 N_0^+ 是没有激发时深能级的电离态密度. 取 $N_0^+ = 1.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ^[8].

当把上述方程组的数值解用于自透射实验数据的拟合时, 透射率 T 定义为 $E(d)/E_0$.

$E_0(d)$ 是脉冲光的透射能量, $E_0(d) = \iiint I(t, x, y, d) dt dx dy$.

三、实验概述

我们使用的是一台主被动锁模的微微秒激光器. 它选单脉冲输出然后放大. 它的基

波光脉冲的半宽度为 50ps, 输出激光光斑的强度分布为高斯型。它的 e^{-1} 直径为 3.5 mm (用小孔对光斑进行横向与纵向的扫描得知)。实验示意图见图 1。基波光经过一块消光比为 5×10^{-5} 的 Glan 棱镜未聚焦直射到

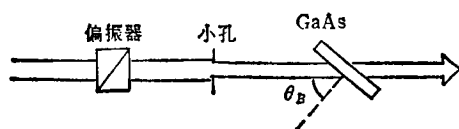


图 1 实验示意图

样品上, 入射角为 Brewster 角 ($\theta = 74^\circ$). 为确定反射光为零, 在反射光方向上, 用灵敏 p-i-n 二极管探测反射的信号。仔细调节样品架子, 使得反射光信号最弱, 一般达到约 0.1—0.2% 的入射光能量。用经能量计仔细

矫正的两只光电二极管探测透射率随光强度的变化。入射光强度定义为光斑中心的强度 (F_0)。在样品之前有一小孔 ($\phi = 2.36$ mm), 挡去光斑边缘部分, 使得投射到样品的光斑强度比较均匀。但若用更小的小孔则容易造成经小孔后的入射光光斑呈干涉状, 这样会影响我们的测量精度。

样品是从中国科学院上海冶金研究所买来的无掺杂半绝缘的 (100) GaAs 片子。它们双面抛光, 样品厚度为 0.58 mm。

四、结果与讨论

图 2 所示是 GaAs 的透射率随入射光强度的变化曲线。从图 2 以及计算表明, 在低激发光强 ($F_0 < 1 \text{ mJ/cm}^2$) 时, 透射率比较高且变化缓慢。这时主要是深能级 EL2 的电子激发为主。随着光强的增加, 非线性吸收加剧, 这对应于深能级 EL2 浓度的减小, 电离态 $EL2^+$ 浓度的增加, 电子从导带经中间态 (深能级) 的跃迁以及直接从价带到导带的双光子跃迁已起明显作用。在高激发强度 ($F_0 > 10 \text{ mJ/cm}^2$) 的情况下, 电子的双光子跃迁占据主导地位, 并且自由载流子的吸收也能影响透射率的变化。我们测得在激发强度 $F_0 < 10 \mu\text{J/cm}^2$ 时, $T = 0.93 \pm 0.01$ 。此时双光子吸收和自由载流子吸收可以忽略。同时, 从公式 $n = (1 - T)F_0 / (d\hbar\omega)$ 不难估计出, 此时被激发的电子浓度小于 N_0^+ 。

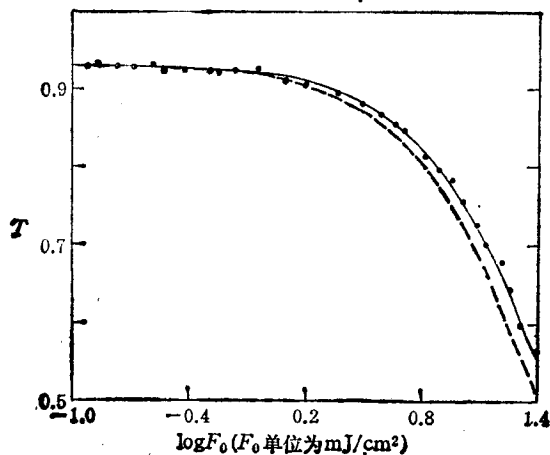


图 2 透射率随入射光强度的变化

圆点为实验点; 实线为最佳理论拟合曲线; 虚线为同一参量下无高斯光强空间修正的理论曲线

由于 $N \gg N_0^{[3]}$, 可以有如下关系式: $T = \exp\{-[S_0(N - N_0^+) + S_n N_0^+]d/\cos\theta\}$.

如果取 $S_0 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^{2[9]}$, 则不难求出: $N = 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 这样方程组 (1)–(4) 中只剩下两个参数 β 与 S_{fe} . 通过改变 β 与 S_{fe} , 发现最佳拟合时的 $\beta = 29 \text{ cm/GW}$, $S_{fe} = 2.7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$. 拟合精度为 $\Delta\beta \leq 4 \text{ cm/GW}$, $\Delta S_{fe} \leq 0.6 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$. 这里 S_{fe} 主要影响 $F_0 > 10 \text{ mJ/cm}^2$ 的透射率的行为, 而 β 对 F_0 在 $4\text{--}10 \text{ mJ/cm}^2$ 范围内的透射率就有明显的影响. 所以, β 与 S_{fe} 的确定是一个相对独立的过程. 这里测得的 β 和 S_{fe} 与我们在另一个关于自由载流子吸收的独立实验中所得的结果^[10]是相一致的.

必须指出, 现有的关于 β 与 S_{fe} 的测量值很不一致^[4,11,12]. 这可能与不同的测量方法和理论解释有关, 也可能与样品的制备有关. 所以, 如要深入研究半绝缘 GaAs 的光波耦合与能量转移的机理, 独立的物理参量测量是必需的.

五、结 论

本文通过无掺杂半绝缘 GaAs ps 光脉冲的自透射的测量和对它的理论拟合, 得到了如下参量: EL2 缺陷浓度 N 为 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 双光子吸收系数 β 为 29 cm/GW , 自由载流子吸收截面 S_{fe} 为 $2.7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$.

- [1] H. J. Eichler, P. Günter, and D. Pohl, *Laser-Induced Dynamics Grating*, Vol. 5 of Springer Series in Optical Science, Springer-Verlag, Berlin, (1986).
- [2] Giovanni Albanese, Jayant Kumar and William H. Steier, *Opt. Lett.*, 11(1986), 650.
- [3] A. L. Smirl, G. C. Valley, K. M. Bohnert and F. Boggess, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-24(1988), 289.
- [4] B. Bosacchi, J. S. Bessey and F. C. Jain, *J Appl. Phys.*, 49(1978), 4609.
- [5] T. F. Boggess, A. L. Smirl, S. C. Moss, I. W. Boyd and E. W. V. Stryland, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-21(1985), 488.
- [6] A. Mitonneau and A. Mircea, *Solid State Commun.*, 30(1979), 157.
- [7] R. K. Jain and M. B. Klein, in *Optical Phase Conjugation*, R. A. Fisher, Ed. New York, Academic, (1983), p. 307.
- [8] M. B. Klein, *Opt. Lett.*, 9(1984), 350.
- [9] P. Dobrilla and J. S. Blakmore, *J. Appl. Phys.*, 58(1985), 208.
- [10] 马海明、李富铭等, 待发表.
- [11] C. C. Lee and H. Y. Fan, *Appl. Phys. Lett.*, 20(1972), 18.
- [12] J. R. Meyer, M. R. Kruer and F. J. Bartoli, *J. Appl. Phys.*, 51(1980), 5513.

SELF-TRANSMISSION OF PICOSECOND LIGHT PULSES IN GaAs

MA HAI-MING LI FU-MING

Department of Physics, Fudan University

(Received 14 November 1988)

ABSTRACT

In this paper, we report the experimental and theoretical results of self-transmission of picosecond light pulses of $1 \mu\text{m}$ in undoped semi-insulating GaAs at Brewster angle incidence. The best fitting density of the deep level EL2 is $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, the two-photon absorption coefficient is 29 cm/GW and the free-carrier cross section is $2.7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$.