

砷化镓中 ps 光脉冲激发的自由电子浓度 及其空间 Fourier 分量的研究

马海明 李富铭
(上海复旦大学物理系, 200433)

摘要: 本文给出了关于半绝缘 GaAs 中 $1.06 \mu\text{m}$ ps 光脉冲产生的自由电子的理论及计算结果, 并讨论了从深能级跃迁与双光子跃迁的自由电子浓度的空间 Fourier 分量随激发光强度的变化。
关键词: GaAs, 自由电子浓度, ps 光脉冲

A study of free-electron density and its spatial Fourier component excited by picosecond light pulses in GaAs

Ma Haiming, Li Fuming
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract: The theory and calculation results of the free electrons generated by picosecond light pulses at $1.064 \mu\text{m}$ in semi-insulating GaAs are presented, and the variation of the spatial Fourier components of the free-electron density from deep levels and two-photon absorption versus the intensity of excitation pulses is discussed.

Key words: GaAs, free-electron density, ps light pulses

一、引言

无掺杂半绝缘 GaAs 由于具有电子从 $EL2$ 深能级的单光子跃迁以及 GaAs 所固有的自由电子高迁移率, 它的光致折射率 (photorefractive) 效应和自由载流子浓度光栅 (free-carrier concentration-grating) 效应近来引起了人们的重视^[1,2]。这两种效应的区别是: 在两束相干光空间干涉场的照射下, 光致折射率效应是指电子从 $EL2$ 态经单光子跃迁到导带后, 由高浓度向低浓度扩散, 引起自由电子与 $EL2^+$ 之间空间上的分离, 产生晶体内部局域场, 从而使折射率产生一种调制作用; 而自由载流子浓度光栅效应则是自由载流子浓度的空间起伏由 Drude 关系^[3]直接导致折射率的空间起伏。前一效应在较低激发强度下与经 $EL2$ 态激发的自由电子浓度的 Fourier 分量密切相关; 而后一效应在较高激发光强下则主要是由从价带经双光子吸收直接跃迁到导带的自由电子浓度的 Fourier 分量有关。所以, 比较在不同激发强度下这两个 Fourier 分量的变化对深入了解半绝缘 GaAs 中的光波耦合和能量转移的机理是有意义的。这种比较的意义还在于, 从非线性光学的角度看电子的双光子跃迁引起的光波耦合是简

并六波混频过程, 而经 $EL2$ 态跃迁的电子引起的光波耦合在低激发强度时是简并四波混频过程。这里, 自由空穴由于其有效质量远大于自由电子的有效质量, 故它的影响可以忽略^[2]。

最近, Smirl 等人通过比较上述两种不同过程产生的自由电子浓度的高低来分析光波耦合的内部机理。不过, 由于他们所用的有关方程^[4]是一个相当大的近似结果, 并且, 更主要的是对光波耦合的贡献不是自由电子浓度的平均值而是它的 Fourier 分量, 所以, 有必要用较严格的方法来考察从深能级激发的自由电子与双光子激发的自由电子的浓度与它们的 Fourier 分量之间的关系, 以期能得到一个比较全面的认识。为此, 本文从理论上给出了 $1.064 \mu\text{m ps}$ 光脉冲激发下的经深能级跃迁与双光子跃迁的自由电子浓度和它们的 Fourier 分量随不同激发光强度的变化, 并对结果进行了讨论。

二、理论模型

考虑有两个相干光脉冲, 它们的强度分别为 F_1 与 F_2 , 传播方向夹角为 θ , 相对延时尚零, 以近正入射重合辐照在无掺杂半绝缘 GaAs 中的情形。如果 $F_1 \gg F_2$ (F_1 表示激发光, F_2 表示探测光), 这就相应于通常的光波耦合与能量放大的情况。由于脉冲光之间的干涉, 晶体中光激发自由电子的浓度在空间上就会出现周期性的起伏(即光栅)。下面, 我们试图分别考察其中经深能级跃迁与直接经价带到导带双光子跃迁的自由电子浓度的 Fourier 分量随激发光强度的变化情况。在一般情况下, 探测光将得到放大。因此, 严格地说, 自由电子浓度的 Fourier 分量与具体的放大情况密切相关。为方便起见, 我们考虑探测光以及激发光基本不变的情形。它对应于较低激发强度 ($F_1 \leq 10 \text{ mJ/cm}^2$) 和小夹角(例如 $\theta \approx 2^\circ$) 的情形。在这种情况下, 自由载流子浓度光栅效应导致的能量转移量很小^[5]。同时, 由于光栅常数大, 自由电子的扩散效应弱, 光致折射率也弱。并且, 在 GaAs 中, 光致折射率效应一般要通过较长晶体作用区(几 mm 至几 cm)的积累才有明显的能量转移。如果我们考虑一般几百 μm 的薄 GaAs 电子, 则可忽略由光致折射效应引起的能量转移。这样, 我们可以近似地忽略光波之间的能量转移及其对自由电子浓度分布的影响。从波动方程中, 作慢变化近似略去两级微商, 并略去折射率的变化与空间局域场的贡献, 得到描述两个光脉冲强度变化的方程^[6]:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial I_i}{\partial t} + \frac{\partial I_i}{\partial z} = -S_e(N - N^+)I_i - S_h N^+ I_i - S_{fc}(n_1 + n_2)I_i - \beta(I_i^2 + 2I_1 I_2), \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

其中: V 是晶体中的光速, z 是晶体表面的法线轴, S_e, S_h 分别是电子从深能级到导带和价带到深能级的单光子跃迁截面, N, N^+ 分别表示总的 $EL2$ 与 $EL2^+$ 的浓度, S_{fc} 是自由载流子的吸收截面, n_1, n_2 分别是深能级与双光子跃迁到导带的自由电子浓度, β 是双光子的吸收系数。

当 $I_1 \gg I_2$, 并忽略自由载流子的扩散与复合时, 无掺杂半绝缘 GaAs 对光脉冲的吸收和内部电子跃迁可以归纳成下列方程^[2]。

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = S_e(N - N^+) [I_1 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(kx)] / (\hbar\omega) \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = \beta [I_1^2 + 4I_1 \sqrt{I_1 I_2} \cos(kx)] / (2\hbar\omega) \quad (3)$$

$$\frac{\partial N^+}{\partial t} = [S_e(N - N^+) - S_h N^+] [I_1^2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(kx)] / (\hbar\omega) \quad (4)$$

其中, $k = 2\pi/\Lambda$ (Λ 为光栅常数)。 x 是入射平面内与 z 轴垂直的坐标轴。

上述方程的初始条件与边界条件为:

初始条件: $t = -3t_p$ (t_p 为脉冲宽度的高斯型常数)

$$n_1(-3t_p, x, z) = n_2(-3t_p, x, z) = 0 \quad (5)$$

$$N^+(-3t_p, x, z) = N_0^+ \quad (6)$$

$$I_i(-3t_p, x, z) = [F_i/(\sqrt{\pi} t_p)] \exp\{-(-3t_p - z/V)^2/t_p^2 - [S_e(N - N_0^+) + S_h N_0^+]z\} \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

边界条件:

$$I_i(t, x, 0) = [F_i/(\sqrt{\pi} t_p)] \exp(-t^2/t_p^2) \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

自由电子浓度的 Fourier 分量定义为:

$$n_{i1} = \frac{1}{d\pi} \int_0^d \int_0^d n_i(t=3t_p, x, z) \cos(kx) dz dx \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

其中, d 是 GaAs 片子的厚度。

上述计算的结果依赖于具体 GaAs 样品与探测光强度的选择。这里, 我们取文献[5]中的有关考量。即: $d=0.6$ mm, $t_p=30$ ps, $F_2=0.06$ mJ/cm²。此外, 一些所利用到的有关无掺杂半绝缘 GaAs 的物理参量列于表 1 之中。

一般来说, 光在 GaAs 样品中传播要经前后两个表面的反射。这里, 我们不计后表

面的反射光的贡献。 F_1, F_2 定义为扣除前表面的反射后实际入射到 GaAs 上的光强度。

表 1 无掺杂半绝缘 GaAs 的有关物理参量

参 量	数 值	参考文献
本征折射率	3.48	[7]
双光子吸收系数 β	30 cm/GW	[5]
EL2 吸收截面 S_e	1.0×10^{-16} cm ²	[8]
EL2 ⁻ 吸收截面 S_h	$S_e/2$	[9]
总的 EL2 浓度 N	1.2×10^{16} cm ⁻³	[5]
EL2 ⁺ 浓度 N_0^+	1.4×10^{15} cm ⁻³	[1]
自由载流子吸收截面 S_{fc}	3.0×10^{-17} cm ²	[5]

三、结果与讨论

我们首先考虑单光子脉冲激发(即 $F_2=0$)的情况。此时从深能级跃迁的自由电子浓度 n_1 与由双光子跃迁的自由电子浓度 n_2 随不同激发光强度 F_1 的变化如图 1 所示。这里 n_1 与 n_2 是在整个样品厚度 d 内的平均值。实线为理论计算结果, 虚线为 n_1 与 n_2 在低激发时的渐进线。它们的斜率分别为 1 与 2。由此可见, 在低激发状态下, n_1 与激发光强成正比, 即主要是 EL2 态上电子的激发。 n_2 与激发光强度成二次幂的关系, 体现双光子吸收的电子跃迁。随着激发光强度的增加, n_1 的变化逐渐偏离斜率为 1 的状态, 其增加明显变慢。此时, 随着 EL2⁺ 态浓度的增加, 或者说中性深能级 ($N - N^+$) 的减少, 对 n_1 的贡献逐渐由最初的 EL2 态的电子激发过渡到价带电子经中间态(深能级)向导带的二步跃迁。与此同时, 在高激发状态下由于自由载流子的吸收增加, 使得 n_2 的变化逐渐偏离斜率为 2 的初始状态。由图 1 可见, 双光子跃迁的自由电子浓度在激发强度为 3.5 mJ/cm² 时开始超越深能级激发的自由电子浓度。当 F_2 不为零但很小时, 它基本上不影响上述的自由电子的平均浓度。

下面考虑有探测光脉冲 ($F_2=0.06$ mJ/cm²) 的自由电子浓度分布的情况, 因为光波耦合强度不取决于自由电子的平均浓度而取决于自由电子浓度空间分布的 Fourier 分量。图 2 示出了从深能级激发与双光子激发的自由电子浓度的 Fourier 分量随不同激发光强度 F_1 的变化情况。实线为计算值, 虚线为双光子激发的自由电子浓度 Fourier 分量在低激发时的渐进

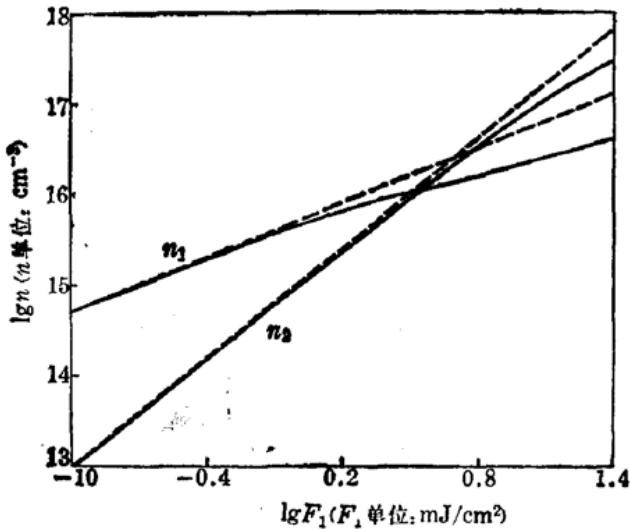


图1 自由电子浓度随激发光强的变化曲线

n_1 —深能级跃迁; n_2 —双光子跃迁

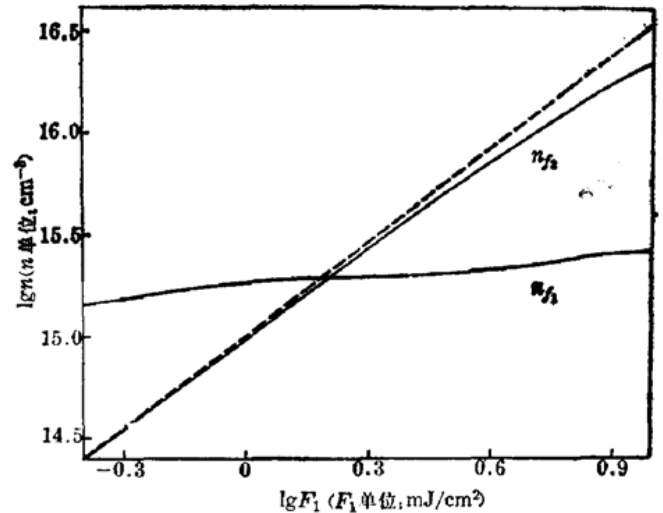


图2 自由电子浓度 Fourier 分量随激发光强度的变化曲线

n_{f1} —深能级跃迁; n_{f2} —双光子跃迁

线, 它的斜率为 $3/2$ 。由图 2 可见, 双光子激发自由电子浓度的 Fourier 分量与图 1 中所示的自由电子的平均浓度, 随激发强度的变化是一致的。有趣的是经深能级跃迁的自由电子浓度的 Fourier 分量的变化却与它对应的绝对浓度的变化明显不一致, 该 Fourier 分量随 F_1 的增加变化十分缓慢, 尤其在 $1.4 \sim 3.5 \text{ mJ/cm}^2$ 的激发光强度内。这一现象来源于如下事实。在低激发光强度下, 从 $EL2$ 激发的电子浓度远小于 $N - N_0^+$, 所以被激发的自由电子浓度与入射光强成正比。这时的自由电子浓度的 Fourier 分量增加得比较快; 随着激发光强度的增加, 原来 $EL2$ 态上的电子跃迁减少, 逐渐呈现饱和趋势, 因而抑制了自由电子浓度 Fourier 分量的增加。同时, 价带电子向 $EL2^+$ 跃迁的数目随着 $N - N^+$ 的减少而上升。当激发光强度继续增加, 深能级 $EL2$ 的电离态 ($EL2^+$) 的数目趋于平衡, 即 $S_0(N - N^+) \sim S_n N^+$ 。此时, 价带电子经深能级向导带的二步跃迁上升为主要过程, 自由电子浓度 Fourier 分量又得到比较快的增加。图 2 表明, 双光子跃迁的自由电子浓度 Fourier 分量在激发光强度 $F_1 = 1.6 \text{ mJ/cm}^2$ ($< 3.5 \text{ mJ/cm}^2$) 时便开始超过深能级激发的自由电子浓度的 Fourier 分量。并在高激发状态下占据主导地位。比较图 1 与图 2, 可以发现, 随着激发光强度的增加, 经双光子跃迁与经深能级跃迁的自由电子浓度 Fourier 分量之比的变化要比它们各自的平均浓度之比的变化快得多。依据这两种过程中产生的自由电子平均浓度的高低是不能真正反映它们各自对光波耦合的实际贡献的。

参 考 文 献

- 1 M. B. Klein, *Opt. Lett.*, **9**(8), 350(1984)
- 2 A. L. Smirl *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-24**(2), 289(1984)
- 3 R. K. Jain *et al.*, in *Optical Phase Conjugation* R. A. Fisher, Ed. (Academic, New York, 1983) 307
- 4 见文献[2]中第 301 页
- 5 马海明, 李富铭 *et al.*, 待发表
- 6 类似的方程见文献[2]
- 7 E. D. Palik, in *Handbook of Optical Constants of Solids*, E. D. Palik, Ed. (Academic, Orlando, 1985) 429
- 8 P. Dobrilla *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **58**(1), 208(1985)
- 9 A. Mitonneau *et al.*, *Solid State Commun.*, **30**(3), 157(1979)