

309-312

# 半导体双光子吸收的阈值光强研究

张学如 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

TN201  
0472.3

**摘要** 研究非共振条件下光脉冲在半导体中传输引起的非线性吸收动力学过程, 在薄样品近似下推导了描述双光子吸收及其诱导自由载流子吸收相对强弱的阈值光强公式, 分析了样品厚度对阈值光强的影响, 解释了GaAs双光子吸收系数的测量值在很大范围内变化的主要原因。

**关键词** 双光子吸收, 自由载流子吸收, 阈值光强.

半导体材料

## 引言

双光子吸收和自由载流子吸收是半导体材料的两种重要的非共振非线性机制, 在光双稳、光限幅以及相关器方面得到应用<sup>[1~4]</sup>. 在材料非线性参数的测试和各种器件的设计过程中, 双光子吸收诱导自由载流子吸收的阈值光强  $I_c$  是一个重要参数.  $I_c$  定义为双光子吸收相等与诱导自由载流子吸收相等时对应的输入光强, 它反映了在某一输入光强作用下, 给定材料的双光子吸收相对诱导自由载流子吸收的强弱. Bechtel 和 Smith 首先研究了这一问题, 并给出了 ps 激光辐射下薄样品的阈值光强<sup>[5]</sup>. 但在光脉冲的非线性传输过程中, 双光子吸收和诱导自由载流子吸收两种非线性过程相互影响, 给阈值光强的精确测量带来困难. 阈值光强还与材料的长度、双光子吸收系数及自由载流子寿命有关. 本文将研究激光脉冲在半导体材料中的非线性传输, 分析入射激光脉宽及样品厚度对阈值光强的影响, 讨论了提高双光子吸收系数测量精度的方法.

13

## 1 阈值光强研究

在慢变振幅近似下, 非线性介质内光传输方程可写成<sup>[6]</sup>

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I - \beta I^2 - \delta NI, \quad (1)$$

这里  $\alpha$  是线性吸收系数,  $\beta$  是双光子吸收系数,  $\delta$  是自由载流子吸收截面,  $N$  是光生自由载流子浓度.  $N$  由速率方程决定, 即

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\beta I^2}{2h\nu} - \frac{N}{\tau}, \quad (2)$$

其中  $\tau$  是自由载流子的寿命. 式(2)忽略了自由载流子的扩散.

考虑时间高斯变化的输入脉冲  $I(z=0, t) = I_m \exp[-(t/\tau_p)^2]$ , 其中  $\tau_p$  为输入激光脉宽. 令  $\xi = z/L, \eta = t/\tau_p, \alpha = I/I_m, N_s = \beta I_m^2 \tau_p / 2h\nu, b = N/N_s, E = \tau_p/\tau$ , 作归一化变换, 式(1)、(2)及初始条件可重写为

本文 1995 年 9 月 12 日收到, 修改稿 1995 年 11 月 3 日收到

$$\frac{da}{d\xi} = -aLa - \beta LI_m a^2 - \delta LN_s ab, \quad (3)$$

$$\frac{db}{d\eta} = a^2 - Eb, \quad (4)$$

$$a(\xi=0, \eta) = a_0(\eta) = \exp(-\eta^2). \quad (5)$$

下面用式(3)、(4)和(5)来分析输入激光脉宽及样品厚度对阈值光强的影响。

### 1.1 薄样品近似

将式(4)的积分结果代入式(3),得到薄样品中光强的一阶微扰解

$$a(\xi, \eta) = a_0(\eta) - aL\xi a_0(\eta) - \beta L\xi I_m a_0^2(\eta) - \delta L\xi N_s e^{-E\xi} a_0^2(\eta) \int_{-\infty}^{\eta} a_0^2(\eta') e^{E\eta'} d\eta'. \quad (6)$$

式(6)右边第二项为线性吸收项,第三项为双光子吸收项,第四项为自由载流子吸收项.脉冲在非线性质传输过程中,双光子吸收与自由载流子吸收相等时,得到阈值光强.

$$I_\sigma = \frac{\sqrt{\pi/2} \cdot 2h\nu}{\delta\tau_p F(E)}, \quad (7)$$

其中

$$F(E) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-E\xi} e^{-\eta^2} \int_{-\infty}^{\eta} e^{-2\eta'^2} e^{E\eta'} d\eta' d\eta. \quad (8)$$

式(8)没有解析积分结果.对式(8)进行数值积分,并用多项式拟合,得到  $I_\sigma$  与  $E$  的关系为

$$I_\sigma = \begin{cases} \frac{h\nu}{\delta\tau_p} f_1(E), & E \leq 1 \\ \frac{h\nu}{\delta\tau} f_2(E), & E > 1 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $f_1(E) = 2.255 + 1.580E + 0.180E^2$ ,  $f_2(E) = 2.440 + 0.141E^{-1} + 3.001E^{-2} - 2.242E^{-3} + 0.668E^{-4}$ .式(9)是包含了激光脉宽与自由载流子寿命的一般阈值光强公式.当  $E^{-1} \rightarrow 0$ ,得到稳态情况的阈值公式

$$I_\sigma = 2.440h\nu/\delta\tau. \quad (10)$$

当  $E \rightarrow 0$ ,得到 ps 情况下的阈值公式

$$I_\sigma = 2.257h\nu/\delta\tau_p. \quad (11)$$

这一结果中的常数因子略高于文献[5]的结论,但低于文献[6]的数值.下文中的数值模拟将比较这3个因子.

图1给出了  $f_1(E)$  和  $f_2(E)$  的计算数据及拟合曲线.图中 \* 代表计算数值,实线为拟合曲线.从图1可知,ps 脉冲作用时  $I_\sigma$  较  $E=1$  时约降低了44%.而对于稳态情况,脉冲下  $I_\sigma$  比  $E=1$  时约降低了39%.当脉冲宽度与自由载流子的恢复时间相同或可比拟时,光生自由载流子浓度的衰减降低了自由载流子吸收,但不影响双光子吸收,因而增大了阈值光强.

### 1.2 样品厚度的影响

一般情况下, 方程(3)和(4)没有合适的近似解. 我们采用有限差分方法进行数值求解. 以 GaAs 为例, 取  $\alpha=0.55\text{cm}^{-1}$ ,  $\beta=25\text{cm/GW}$ ,  $\delta=3\times 10^{-18}\text{cm}^2$ ,  $\tau=15\text{ns}$ ,  $L=0.1\text{cm}$ . 为了便于比较, 定义阈值能流密度为  $F_{cr}=I_{cr}\tau_p$ .

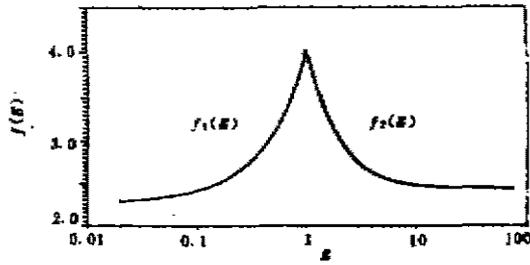


图 1  $f_1(E)$ 和 $f_2(E)$ 随 $E$ 的变化  
Fig. 1  $f_1(E)$  and  $f_2(E)$  as a function of  $E$

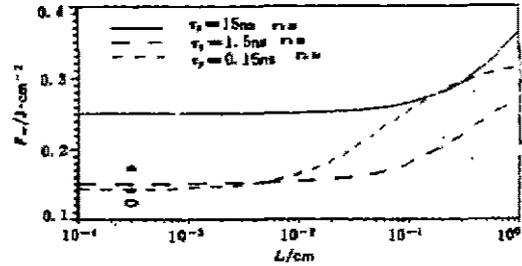


图 2 样品长度对阈值能流密度的影响  
Fig. 2 The influence of sample length on threshold fluence

图 2 给出了分别对应于  $E=0.01$ 、 $E=0.1$  及  $E=1$  的阈值能流密度  $F_{cr}$  随  $L$  的变化曲线. 图中 \* 代表  $\tau_p=0.15\text{ns}$  时用式(11)计算的阈值能流密度.  $\Delta$  和  $\circ$  分别是相同条件下文献 [5]和[6]的计算结果. 由本文公式计算的结果与数值计算结果符合得很好. 从图 2 中还可看出, 样品厚度对阈值能流密度的影响随激光脉宽的不同而变化较大. 对  $\tau_p=15\text{ns}$  的辐射激光,  $L<0.1\text{cm}$  时阈值能流密度基本上不变, 都可看作薄样品. 但是随着  $\tau_p$  的降低, 可看作薄样品的长度也愈低. 另外, 随着样品厚度的增加, 阈值能流密度将增大. 这是由于双光子吸收是三阶非线性效应, 而诱导自由载流子吸收是五阶非线性效应. 随着样品长度的增加, 脉冲在非线性传输过程中的强度降低, 使光生自由载流子吸收的降低较双光子吸收的降低为甚, 因而提高了阈值能流密度.

### 2 结论与讨论

本文首次用数值求解法给出薄样品近似下半导体中双光子吸收的阈值光强的普遍公式(9), 式(9)不仅适用于 ns 脉冲, 也适用于稳态与 ps 脉冲两种极端情况. 该式(9)是文献[5]中相关公式的推广, 并且更接近数值计算结果. 通过数值计算, 我们发现样品厚度对阈值光强有较大影响, 随着样品厚度的增加, 阈值光强也随之增大. 增大的阈值光强表明在相同的光强作用下, 厚样品中自由载流子吸收所占的比例较薄样品的少. 因而采用非线性透过技术测量双光子吸收系数时, 厚样品测得的双光子吸收系数也应较薄样品的小, 并更接近实际情况. 文献[5]中的实验结果证实了这一点. 因此, 在双光子系数的测试和双光子自相关器的设计中, 适当选择样品厚度, 将使实验效果更佳.

图 3 给出了 GaAs 样品在  $\tau_p=15\text{ns}$  及  $\tau_p=0.15\text{ns}$  时不同输入光强所对应的输入、输出时间波形, 其它参数与 1.2 节中的相同. 在图 3(a)中, 对应  $I_{in}=0.05\text{GW/cm}^2$ , 双光子吸收和自由载流子吸收所占的比例分别为 6.2%和 15.9%. 在图 3(b)中, 对应  $I_{in}=0.5\text{GW/cm}^2$ , 双

光子吸收和自由载流子吸收所占的比例分别为 36.6% 和 14.1%，两者输出波形并没有明显的变化。因此，在双光子吸收系数的测试中，在可分辨非线性透过率的基础上，应尽可能用较小的输入光强。同时，采用 ps 和 0.1ps 激光，将使自由载流子吸收的影响降至最低。

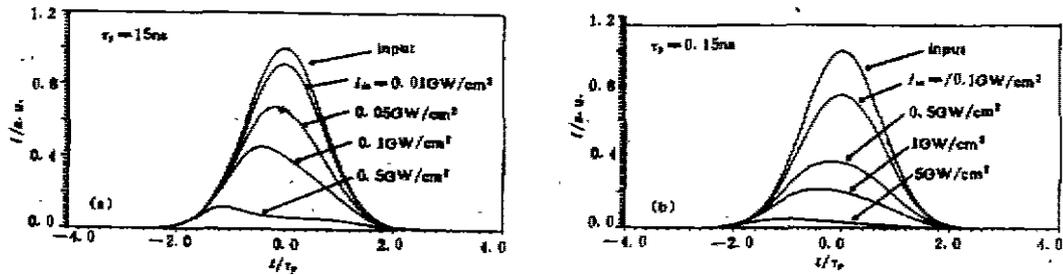


图3 半导体介质中输出脉冲波形，(a) ns 脉冲，(b) ps 脉冲  
Fig. 3 Output pulse shapes obtained after propagation through semiconductor medium for ns pulse (a) and ps pulse (b)

### 参考文献

- 1 Kar A K, et al. *Phys. Lett.*, 1983, 42: 334
- 2 Stryland E W Van, et al. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, B5(9), 1980
- 3 Hagan D J, et al. *International Journal of Nonlinear Optical Physics*, 1993, 2(4), 483
- 4 Laughton R, et al. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, 30: 838
- 5 Bechtel H, et al. *Phys. Rev.*, 1976, 13: 3515
- 6 Stryland E W Van, et al. *Opt. Eng.*, 1985, 24: 613

## STUDY OF THRESHOLD INTENSITY OF TWO-PHOTON ABSORPTION IN SEMICONDUCTORS

Zhang Xueru Li Chunfei

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The dynamic process of nonlinear absorption in a semiconductor medium caused by nonlinear optical pulse propagation in the condition of nonresonance was studied. The threshold intensity formula was deduced in the limit of small absorption, which describes the relative size of two-photon absorption and free carrier absorption. The effect of the sample thickness on the threshold intensity was analyzed. The main origin of the great disparity in the measured values of two-photon absorption coefficient of GaAs was explained.

**Key words** two-photon absorption, free carrier absorption, threshold intensity.