

利用砷化镓中的光波耦合测定皮秒光脉冲之间的零延迟

马海明 李富铭

(复旦大学物理系, 200433)

提要: 利用 GaAs 中光波之间的能量转移依赖于延迟时间的性质, 测定皮秒(ps)光脉冲之间的零延迟。这种方法被证明是在小夹角时测量光波之间零延迟的一种方便、准确的新方法。

关键词: ps 光脉冲, 零延时测量

Determination of zero-time delay among picosecond light pulses by using wave-mixing in GaAs chips

Ma Haiming, Li Fuming

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract: Zero-time delay among picosecond light pulses can be determined by using time-delay dependent energy-transfer in GaAs chips. This new method has been proved to be convenient and accurate in the determination of zero-time delay among light pulses at small intersection angles.

Key words: ps light pulse, determination of zero-time delay

一、引言

在瞬态现象的研究中, 往往需要测定或者精确测定两个超短光脉冲之间的零延迟。最常用的测量方法是非线性晶体中的倍频与和频^[1]、双光子荧光^[2]和半导体的表面反射倍频^[3]等方法。这些方法从本质上说都是频率的上转换, 而且都是光脉冲之间强度的二阶或三阶的相关。考虑两束光之间的小夹角情况(如 $\theta=1^\circ\sim 15^\circ$)。用非线性晶体 KDP 等的倍频或和频来测定两个脉冲之间的零延迟时存在着位相匹配的问题。如果要求两束光之间的夹角可变化(如瞬态光栅实验中所需的不同光栅常数), 则用某一固定切向的 KDP 晶体的非共线匹配的倍频或和频是不行的。一般的晶体往往要求共线的位相匹配, 为此需在两束光之间插入一镜片, 使两束光共线投射到非线性晶体中产生频率上转换的信号。如果两束光的夹角很小, 这块镜片就必须很薄, 且要有适合的透射率与反射率, 而这个要求往往在实验中不具备。此外, 用双光子荧光和半导体的表面反射倍频的方法, 虽然原则上能测定任意夹角的零延迟, 但实际使用时十分麻烦。尤其在一次实验中要求多次确定不同夹角下的零延迟时, 上述方法就显得更为不便。

本文提出一种在小夹角时简便、准确地测定 Nd:YAG 锁模脉冲的零延迟的方法,它不同于频率上转换的方法,而是利用半导体 GaAs 中的光波耦合依赖于延迟时间这一性质。

二、原理概述

当两个波长为 $1\mu\text{m}$, 光强与光斑都相同的强光脉冲照射在 GaAs 上时,会通过双光子吸收产生自由载流子,这些自由载流子最初具有一定的剩余能,通过发射 LO 声子在 $1\sim 2\text{ps}$ 内迅速弛豫到导带底^[4]。由于光脉冲之间的干涉,自由载流子的浓度会在空间上形成周期性变化,并通过 Drude 关系形成折射率光栅^[5]。这种折射率光栅能够把一个光脉冲的能量衍射到另一个光脉冲所传播的方向或其他的衍射级方向上^[6]。

设 C_{+1} 、 C_{-1} 分别为上述两个光脉冲的波振幅,且当 $|C_{+1}| \gg |C_{+m}|$ ($m \neq 1$) 时,晶体中的自由载流子浓度 N 与电场强度 E 可以表示成:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \beta |C_{+1} + C_{-1}|^4 / (2\hbar\omega) \quad (1)$$

$$N = N_0 + N_2 \sin(2k_x x + \phi_2) + N_4 \sin(4k_x x + \phi_4) \quad (2)$$

$$E = [8\pi / (C\hbar\epsilon_0)]^{1/2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \exp[i(\omega t - k_x z - m k_x x)] \quad (3)$$

其中, β 是双光子吸收系数, z 是垂直于样品表面的空间坐标, x 是在入射光平面内与 z 轴垂直的坐标轴。 N_2 、 N_4 是自由载流子浓度分布的第 2 与第 4 阶 Fourier 分量的实振幅, ϕ_2 、 ϕ_4 是它们的相对位相。 $k_x = k_0 \sin(\theta/2)$ 和 $k_z = n_b k_0 \cdot \cos(\theta'/2)$ (k_0 是真空中波矢, θ 是入射光之间在样品外的夹角, θ' 是入射光在样品中的夹角)。 n_b 是 GaAs 的折射率 ($n_b = 3.48$), C_m 是第 m 阶衍射光的波振幅, d 为样品厚度。

把式(2)、(3)代入波动方程,并且略去光吸收与二阶小量,可以得到在 $t_p C / (n_b d) \gg 1$ 时描述 $C_{\pm 1}$ 变化的基本方程为^[6,7],

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{+1}}{\partial z} + \frac{1}{2d} \{ [C_{-1} \exp(i\phi_2) - C_{+3} \exp(-i\phi_2)] V_2 \\ + [C_{-3} \exp(i\phi_4) - C_{+5} \exp(-i\phi_4)] V_4 \} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{-1}}{\partial z} + \frac{1}{2d} \{ [C_{-3} \exp(i\phi_2) - C_{+1} \exp(-i\phi_2)] V_2 \\ + [C_{-5} \exp(i\phi_4) - C_{+3} \exp(-i\phi_4)] V_4 \} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$V_L = k_0 d \delta_D N_L \quad (L=2, 4) \quad (6)$$

其中, δ_D 是折射率与自由载流子浓度之间的 Drude 系数^[4]。

由于 $C_{\pm 1} = C_{\pm 1}(x, y, z, t)$, 所测量到的信号 $I_{\pm 1} = \iiint_{-\infty}^{\infty} C_{\pm 1}(x, y, d, t) \cdot dx dy dt$ 。在零延迟

条件下,两个脉冲之间的能量转移正好抵消,即 $\Delta I = I_{+1} - I_{-1} = 0$ 。如果两者的延迟不为零,则自由载流子浓度光栅产生于两个脉冲的重叠部分。这时能量转移不会抵消,它使后到的光脉冲被衍射至先到光脉冲的方向的能量大于相反过程的能量。这样,先到的脉冲净增强,后到的脉冲净减弱。利用这一效应,就可以测定两个脉冲之间的零延迟。零延迟测定的精度正比于 $|\partial(\Delta I) / \partial \tau| / I_0$, τ 是两个光脉冲之间的延迟时间, I_0 为零延迟时的 $I_{\pm 1}$ 。当然,测量零延迟

的精度还得由具体实验中信号的涨落及系统误差来决定。从式(1)~(6)可见,由于折射率光栅是由两个脉冲中的相干区域产生的,所以,零延迟测定的精度与待测光脉冲的相干时间以及脉宽密切相关。

三、实验概述

所用的是一台主被动锁模的 Nd:YAG 激光器,工作在 10 Hz 状态,基波光脉冲的半宽度为 50 ps,脉冲的相干时间为 28 ps,输出光斑的 e^{-1} 直径为 3.5 mm。激光器输出的基波光被一块 50% 的分束片分成两束,它们的强度和光斑大小相同。其中一束经过一步进马达控制的延迟装置与另一束重合照射在 GaAs 样品上。两束光之间的夹角可调($\theta=1^\circ\sim 15^\circ$)。实验光路如图 1 所示。

使用的样品是不掺杂半绝缘的 [100]GaAs 片,双面抛光,厚为 0.58 mm。

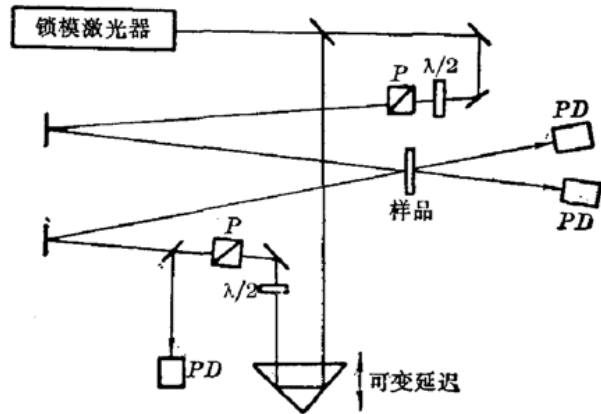


图 1 实验光路示意图

P—偏振器, $\lambda/2$ —半波片; PD—光电二极管

四、实验结果及讨论

图 2 是两束光的相对透射率随不同延时的变化曲线,两束光之间的夹角 θ 为 10° ,每个脉冲强度为 15 mJ/cm^2 。从图中可见,两束光的透射率变化具有对称性。零延迟可以方便地从对称中心处找到。在这样的激发强度下,自由载流子浓度光栅主要由双光子激发的自由载流子所产生^[8]。双光子激发通常会产生两个光栅,它们的光栅常数分别为 $\Lambda_1=\lambda/[2\sin(\theta/2)]$ 和 $\Lambda_2=\lambda/[4\sin(\theta/2)]$ 。由于 Λ_2 的存在,透射光中除了原来的两束光(分别用 +1 级与 -1 级表示)外,在它们两侧还有比较弱的两个衍射光(分别用 +3 级与 -3 级表示)。+3 级位于 +1 级之旁,而 -3 级位于 -1 级之旁。如果 +1 级对应的脉冲先于 -1 级对应的脉冲到达样品,+1 级与 +3 级同时增强,而 -1 级较弱,-3 级可减弱到几乎消失。相反亦然。当 θ 变小到接近 2° 时,可以发现许多级的衍射光出现在 +3、-3 级两旁。这是由于位相失配量减少的缘故^[8]。这里,我们想指出的是用这种方法测定零延迟时有两个优点。第一,比一般频率上转换强度相关方法有更高的测定精度;图 3 是我们用传统的偏振正交的两束光在近共线条件下在 II 类匹配的 KDP 晶体测得的倍频相关信号。比较图 2 与图 3 在零延迟附近的信号变化率,不难发

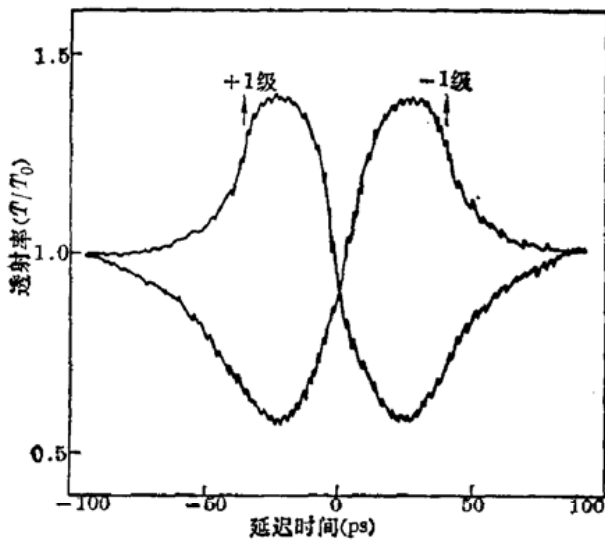


图2 两个脉冲的透射率随延迟时间的变化曲线
 T_0 为单独一个脉冲的自透射率

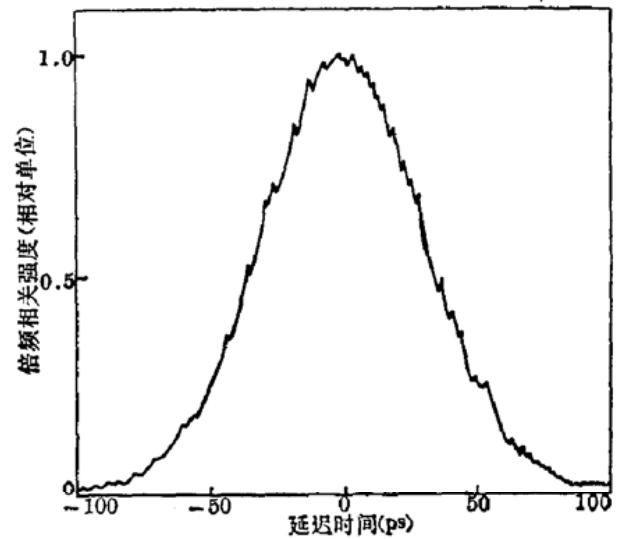


图3 激光脉冲的倍频二级相关曲线

现, 光波耦合的透射率相对延迟有更灵敏的变化, 因而也具有更高的测定零延迟的精度。第二, 非常简便。实验中, 只要用一张近红外灵敏的纸片在 GaAs 后观察 ± 1 、 ± 3 级或其他的衍射级次(如果有的话)的强度随延迟的变化。比较它们的强度变化的对称性, 就可以方便地定出零延迟的位置, 而毋需用光电系统来测量。由于 ± 1 级的透射率在零延迟附近的变化很陡, 并且还可以比较 ± 3 级或者更高的衍射级次强度的对称性, 用这种目测的方法所得到的零延迟具有较高的精度。零延迟的定位精度与待测脉冲的相干时间及脉宽密切相关。对于我们所使用的光脉冲, 我们发现零延迟的精度一般在 ± 5 ps 内。当激发强度减弱时, 例如为 5 mJ/cm^2 时, 高级衍射变弱, 甚至消失, 但类似图 2 的变化依然存在, 用红外灵敏纸依然可以方便地测定零延迟。

对于其他波长的 ps 光的零延迟, 可以通过寻找与之相适合的半导体材料来测定。不过这种方法有两个限制, 其一是待测定的两个脉冲必须是同一波长的; 其二是这种方法不适用大夹角的零延迟测定。因为在大夹角时, 由于光栅常数很小, 导致载流子浓度光栅的寿命很短, 从而影响光波之间的能量转移效率。

参 考 文 献

- 1 马海明, 刘一先 *et al.*, 半导体学报, **9**(2), 163 (1988)
- 2 刘一先, 马海明 *et al.*, 光学学报, **6** (1), 1 (1986)
- 3 马海明, 刘一先 *et al.*, 中国激光, **15** (5), 283 (1988)
- 4 C. V. Shank *et al.*, *Solid State Commun.*, **26** (9), 567 (1978)
- 5 R. K. Jain and M. B. Klein, in *Optical Phase Conjugation* (R. A. Fisher, Ed. New York, Academic, 1983), 307
- 6 H. J. Eichler, P. Gunter *et al.*, *Laser-Induced Dynamics Grating*, Vol. 5 of Springer Series in Optical Science (Springer-Verlag, Berlin, 1986)
- 7 W. R. Klein and B. D. Cook, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* **SU-14** (3), 123 (1967)
- 8 马海明, 李富铭 *et al.*, 待发表