

双光子开关的自相关函数

廖世强

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

C. H. Brito Cruz and M. A. Scarparo

(Departamento de Electronica Quantica, Universidade Estadual de Campinas, Brazil)

提 要

本文推导出半导体双光子光电导开关的自相关函数, 给出对照比与激光强度的关系。实验测出 GaAs 在 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光超窄脉冲作用下的双光子自相关函数。

关键词: 双光子开关, 自相关函数。

一、概 述

Lee^[1]首先报道实验观测到在 ns 及 ps 光脉冲作用下, GaAs 晶体的双光子光电导现象。随后, Mak 及 Lee^[2]利用这一效应, 以 $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ 晶体研制了一台七通道双光子光电导探测器, 用于测量单个超窄光脉冲宽度。作者研制了一台用 GaAs 晶体构成的二级激光强度自相关测试装置; 推导出双光子开关的自相关函数、测出 ps 光脉冲的自相关函数曲线, 并推算出光脉冲宽度, 它具有较好的对照比。

二、原 理

实验原理如图 1 所示, 一个望远镜将一束发散的超窄激光脉冲序列会聚成平行光束。然后用分束器将入射光束分为两束强度相等的光束。其中, 一束光一经固定光程到达双光子开关, 另一束光则通过直角反射镜组, 其光程可调节改变, 两束光通过透镜聚焦在双光子开关的狭缝上。实验要求半导体的能隙 E_g , 与激光频率 ν , 满足关系式

$$h\nu < E_g < 2h\nu, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, 在双光子开关的两个电极上加有偏压 V_0 。当双光子光电导 ΔG 产生时, 可以通过测量串联电阻上的偏压改变量 ΔV 获得。由图 1 可得

$$\Delta V = V_0 \frac{R \Delta G}{1 + R \Delta G}. \quad (2)$$

Basov^[3]和 Yee^[4]用单激光束与半导体相互作用模型, 在定态受激条件下推导出双光子光电导的表示式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta G &= \Delta G_0 \frac{LI_0^2}{1 + KI_0L}, \\ \Delta G_0 &= \frac{c}{a} |e| (\mu_e + \mu_h) A_0 \tau_{00} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

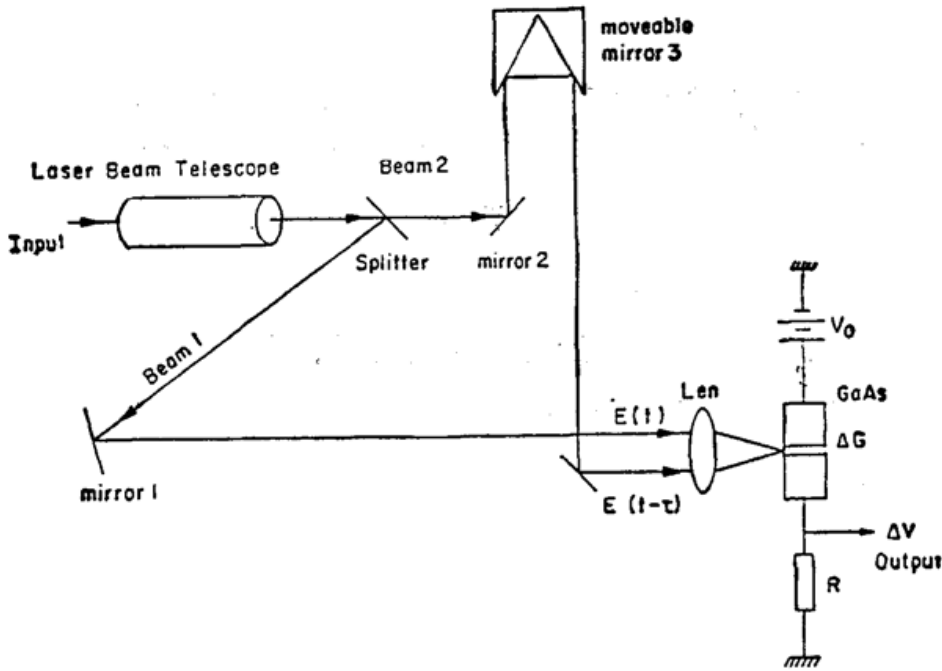


Fig. 1 Experimental arrangement for measuring the intensity autocorrelation of picosecond pulses by two-photon switch technique

式中 c/a 为晶体样品的几何因数; μ_e 和 μ_h 分别为电子与空穴的迁移率; A_0 为与能带参量有关的常数; e 为电子电荷; τ_0 为电荷载子寿命; I_0 为入射激光强度; L 为晶体厚度; $K = 2h\nu A$ ($\text{cm} \cdot \text{MW}^{-1}$) 为双光子吸收系数。

值得注意的是,不能将(3)式直接应用于(2)式中。原因就在于 Basov 的模型是单束光中的双光子效应,而本文讨论的是工作于脉冲序列状态下的双束光。因此必需将(3)式推广到双束光模型中去。考虑一束振幅为 $E_0(t)$ 的入射光脉冲序列,被分束为两束,这时对应的振幅变为 $[E_0(t)/\sqrt{2}]$ 。两束光各自对应的光程长为 D_1 和 D_2 。然后并束入射在双光子开关上,这时两脉冲序列可写为

$$\left. \begin{aligned} E_1(t) &= \frac{E_0(t)}{\sqrt{2}} \exp(i\omega t), \\ E_2(t-\tau) &= \frac{E_0(t-\tau)}{\sqrt{2}} \exp[i\omega(t-\tau)], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $\omega = 2\pi\nu$ 。因此, (3)式中的 I_0 应写为

$$I_0 = \frac{1}{2} |E_1(t) + E_2(t-\tau)|^2$$

$$\begin{aligned} I_0^2 &= \frac{1}{16} \{ E_0^4(t) + E_0^4(t-\tau) + E_0^2(t) E_0^2(t-\tau) \{ 2 + [\exp(i\omega\tau) + \exp(-i\omega\tau)] \} \}^2 \\ &\quad + 2 [E_0^3(t) E_0(t-\tau) + E_0(t) E_0^3(t-\tau)] [\exp(i\omega\tau) + \exp(-i\omega\tau)]. \end{aligned} \quad (5)$$

双光子开关的输出讯号,实质上是记录了两束激光脉冲序列的光强平方 I_0^2 的数值,但是输出讯号具有一响应时间。也就是说两脉冲序列间有一个相关时间 τ 。如果取 τ 大于脉冲的半宽度 $\Delta\tau$, 即 $t \rightarrow \Delta\tau$, 这时输出讯号 ΔV 最小。如果 $\tau = 0$, 这时输出讯号 ΔV 有最大值。而且当取每一个测量点时,在时间上是取平均值。(5)式对时间取平均后有

$$I_0^2(t) = \frac{1}{16} [E_0^4(t) + E_0^4(t-\tau) + 4E_0^2(t) E_0^2(t-\tau)]. \quad (6)$$

另外,注意到 KI_0L 是一吸收项。于是得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta G &= \Delta G_0 L W(\tau) [1 + 2A(\tau)], \\ W(\tau) &= \frac{1}{16} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[E_0^4(t) + E_0^4(t-\tau)] dt}{1 + K E_0^2(t) L}, \\ A(\tau) &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E_0^2(t) E_0^2(t-\tau) dt}{1 + K E_0^2(t) L} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[E_0^4(t) + E_0^4(t-\tau)] dt}{1 + K E_0^2(t) L}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[E_0^4(t) + E_0^4(t-\tau)] dt}{1 + K E_0^2(t) L}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

这里, $W(\tau)$ 为产生双光子效应的有效二级激光强度。 $A(\tau)$ 为二级激光脉冲强度的自相关函数。

最后得到双光子开关的输出讯号为

$$\Delta V(\tau) = \frac{V_0 R L \Delta G_0 W(\tau) [1 + 2A(\tau)]}{1 + R L \Delta G_0 W(\tau) [1 + 2A(\tau)]} \quad (8)$$

以及对照比

$$\Delta V(0) : \Delta V(\tau \gg \Delta\tau) = \frac{3(1 + R L \Delta G_0 I_0^2)}{1 + 3 R L \Delta G_0 I_0^2} : 1 \quad (9)$$

值得注意的是,实验直接记录到的是(8)式的讯号,而不是 $A(\tau)$ 。在(9)式中当选用的晶体样品厚度 L 太厚,串接电阻 R 过大,激光强度愈大,对照比愈是偏离 3:1。为了获得理想的 3:1 对照比,实验中应取小数值的 L 及 R , 以及适量光强的激光,以满足 $3 R L \Delta G_0 I_0^2 \ll 1$ 的条件。

三、实 验

实验用 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光的 ps 脉冲,单光子能量为 1.17 eV, 测量 GaAs 双光子电导开关的自相关函数曲线。GaAs 的能隙为 1.42 eV, 能够很好的满足(1)式条件,晶体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 在一面表面用金真空镀膜成两个电极,电极间留有一条宽度为 $40 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 的狭缝,制成光电导开关器件。

由(3)式,当 $K L I_0 \ll 1$ 时,双光子光电导讯号与激光强度有二次方关系。另外,半导体材料中总是含有少量杂质,在能隙中也渗有杂质能级,使得 GaAs 晶体同样对 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光产生单光子光电导效应。Yee^[5]给出了单光子光电导与激光强度的关系为

$$\Delta G = \frac{c}{a} |e| (\mu_e + \mu_n) I_0 \tau_0, \quad (10)$$

即单光子光电导与激光强度成线性关系。比较(3)式与(10)式,在实验的实测曲线中,实际上存在两个区域。用对数坐标时,曲线的斜率为 2 时为双光子光电导,曲线的斜率为 1 时为单光子光电导,做双光子实验时必须选择系统工作在斜率为 2 的区域以内。GaAs 的双光子吸收系数 $K = 3.6 \text{ cm/MW}$ ^[5]。

本实验中使用的激光强度在 7 MW/cm^2 以内, $K I_0 = 25 \text{ cm}^{-1}$, 因此选用的晶体厚为 0.3 mm 以满足 $K L I_0 \ll 1$ 条件。这时半导体的电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 实验中偏压 $V_0 = 20 \text{ V}$, 串接电阻 $R = 160 \Omega$, 图 2 为实测的光电导与激光强度在对数坐标中的关系曲线,用两块

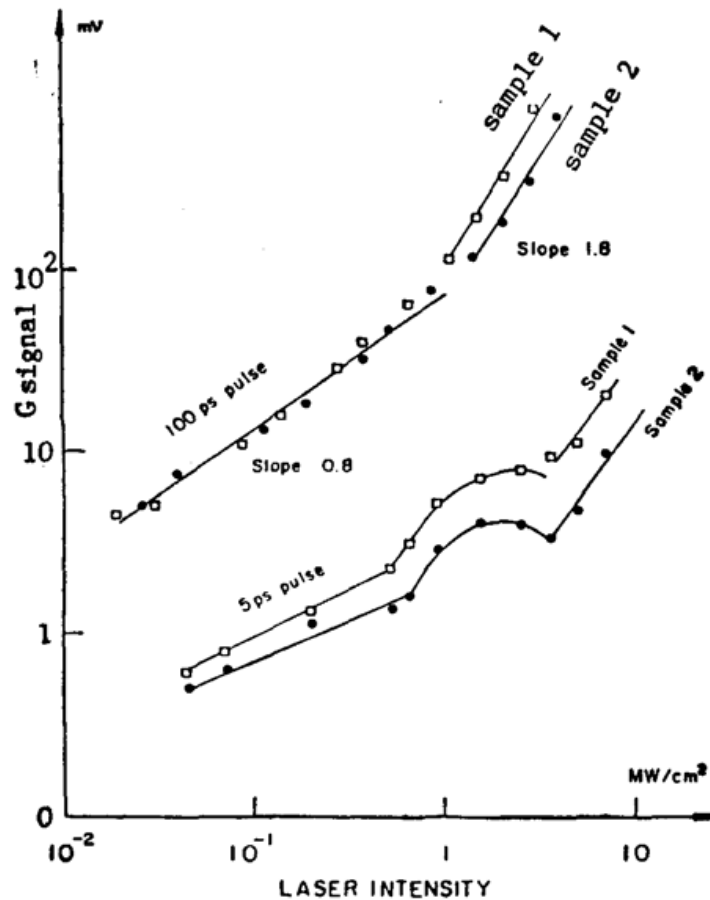


Fig. 2 Two-photon photoconductive signal verse relative laser intensity

晶体样品。一组曲线是用声光锁模 Nd:YAG 激光脉冲测量, 激光脉冲宽度为 100 ps, 一组曲线是用光纤压缩 Nd:YAG 激光脉冲测量, 脉宽为 5 ps。曲线斜率为 0.8 的区域, 对应于单光子光电导效应。曲线斜率为 1.8 的区域, 对应于双光子光电导效应。

实验中观察到这样一种现象, 在使用声光锁模激光脉冲序列时, 单光子和双光子开关效应的转变几乎是突变发生的。而在光纤压缩激光脉冲序列时, 两者之间的转变却不是突变性的, 而是有一峰形区。但实验条件是: 两种脉冲序列除了脉宽不同以外, 使用的 GaAs 样品相同的, 衰减片也是相同的。其原因目前尚无法解释。

用图 1 实验装置测量双光子开关的自相关函数曲线时, 两束激光应仔细地调整聚焦在光电导开关的狭缝上。同时, 被聚焦的激光强度应选择在斜率为 1.8 的工作区内。当可移动的镜子在相关长度 ΔD 内移动时, 直接测出自相关函数曲线。以及通过测量到的相关长度测得脉冲的宽度^[6]

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta D}{c}, \quad (11)$$

式中 c 为光速。图 3 为实测的声光锁模 Nd:YAG 激光脉冲序列的双光子开关的自相关函数曲线, 各个测量点对应于可移动镜子在导轨上的位置, 输出讯号用数字式电压表直接读出, 测出的脉冲宽度为 100 ps, 对照比为 2.5:1。

图 4 为光纤压缩 Nd:YAG 激光脉冲序列的自相关函数曲线, 可移动镜子用马达带动, 双光子开关讯号直接用记录仪记录。实测得的脉宽为 5 ps, 对照比为 2.2:1。

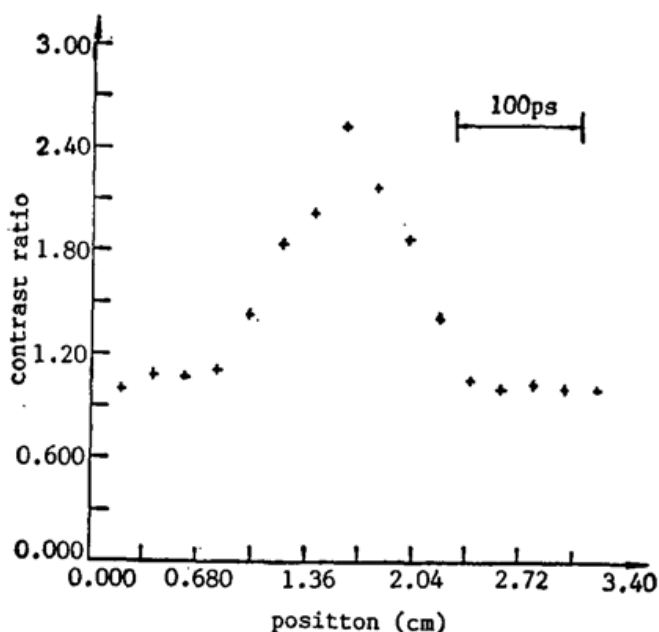


Fig. 3 Measured autocorrelation curves of the mode-locked Nd:YAG laser pulse train. The measured pulse width is 100ps

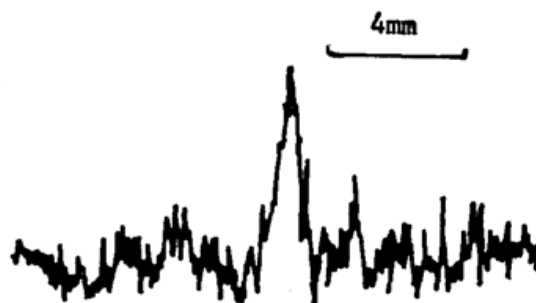


Fig. 4 Recorded autocorrelation curves of the fibre compressed Nd:YAG laser pulse train. The measured pulse width is 5 ps, the contrast ratio is 2.2:1

四、讨 论

实验误差主要来自聚焦的焦斑 ($2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$), 容易引起一个直流热漂移讯号, 叠加在双光子光电导讯号之上。特别是声光锁模 Nd:YAG 激光脉冲序列的平均功率较大 (实验中为 4 W) 时, 激光束长期聚焦在器件上, 甚至会烧损晶体表面。因此, 对每一个测量点, 只能作短时间测量, 实验中测量的取样时间一般不超过一秒, 而且每次测量之间有较长时间的间隔, 以防止热效应的影响, 这就要求激光器有较好的功率稳定性。用光纤压缩 Nd:YAG 激光脉冲序列时, 由于平均功率较低 (200 mW), 这时才能连续工作, 用记录仪直接测绘自相关函数曲线。

参 考 文 献

- [1] S. Jayaraman, C. H. Lee; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**, No. 10 (May), 392~393.
- [2] P. S. Mak *et al.*; *Rev. Scient. Instrum.*, 1980, **51**, No. 5 (May), 647.
- [3] N. G. Basov *et al.*; *Soviet Phys. JETP*, 1966, **23**, 360.
- [4] J. H. Yee; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, No. 7 (Mar), 231~233.
- [5] J. H. Yee; *Phys. Rev.*, 1969, **186**, No. 3 (15 Oct), 778~783
- [6] A. J. DeMaria *et al.*; *Proc. IEEE*, 1969, **57**, No. 1 (Jan), 2~15.

Autocorrelation function of two-photon switch

LIAO SHIQIANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

C. H. BRITO BRUZ AND M. A. SCARPARO

(Departamento de Electronica Quantica Universidade Estadual de Campinas, Brazil)

(Received 14 March 1990)

Abstract

The autocorrelation function of two-photon photoconductivity signals is studied and the relation of contrast ratio and laser intensity is presented. A second order laser intensity autocorrelator of semiconductor GaAs is fabricated to measure the two-photon autocorrelation function of Nd:YAG laser pulses train.

Key words: two-photon switch; autocorrelation function.