

用锁模激光控制的 GaAs 光电子开关

朱鑫铭 陈兰荣 支婷婷

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

利用 Cr 掺杂的 GaAs 材料构成同轴型开关。用 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 超短光脉冲控制开关, 观察开关的输出特性, 得到了激光能量与开关效率的关系曲线。并分析了高功率激励下的光电导特性。

一、引 言

1975 年 Auston^[1] 首次利用本征型单晶硅的光电导特性做成了激光控制的微微秒光电子开关。其后, Lee^[2] 用 Cr-GaAs, Leonberger 和 Moulton^[3] 用 InP, Auston^[4] 用 $\alpha\text{-Si}$, Mak, Mathur 和 Lee^[5] 用 $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$, Smith 和 Auston^[6] 用离子束损伤过的硅, 也都得到了成功。这类开关不属于雪崩型, 时间抖动小, 上升快, 同步精度高, 可以直接开关高电压。近年来不少文献报道了探索这种开关的应用的实验结果。但是对开关工作时的物理过程, 即对半导体材料在超短光脉冲作用下的光电导特性研究得很不够, 其中有两个实验现象不能解释: (1) 在不同波长的激光作用下, 光生载流子的寿命也不同。(2) 在 $0.53\mu\text{m}$ 超短光脉冲作用时, 需要的激光能量比理论计算值大许多倍。本文报道了分别用 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 超短脉冲作用于一个同轴型砷化镓光电子开关, 得到了激光能量与开关效率的关系曲线, 并分析了高功率激励下光电导的特点。

二、实验和结果

实验装置见图 1。锁模光脉冲 1 以小角度入射到楔形平板玻璃 2 上, 占 92% 的透射光照到砷化镓开关 7 上。一束 4% 的反射光经过聚焦透镜 3, 衰减片 4 进入硅光电池 5 接收。通过数字显示仪 6 可以监视每次照到开关上的能量。在开关的一端加上直流偏压 8, 另一端接示波器 9, 测量在光脉冲作用时开关的输出。在本实验中, 锁模脉冲由一台被动锁模的 Nd:YAG 振荡器产生, 经过单脉冲挑选, 两级放大, KDP 晶体倍频和棱镜色散, 最后得到脉宽约为 50 ps 的 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 超短光脉冲, 脉冲能量在 $10^{-7}\sim 10^{-3}\text{J}$ 之间可变。硅光电探测数字显示仪有很高的灵敏度, 可以测量 10^{-9}J 级微弱能量, 在实验之前先用激光能量卡计对它相对定标。砷化镓光电子开关的结构如图 2 所示。1 是金属外壳, 2 是通光窗口, 3 是 GaAs 材料, 4 是电绝缘层, 5 是高压氮气, 6 是电极头, 7、8 是同轴电缆。选用 Cr 掺杂 GaAs 材料, 电阻率约为 $1.2\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}$, 选料的原则是高阻和载流子的高迁移率。把

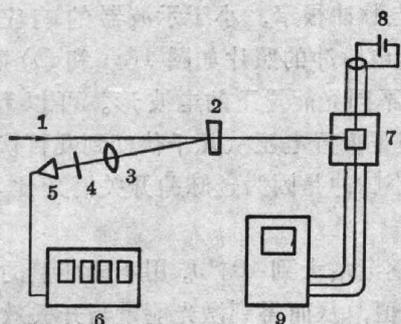


图 1 GaAs 光电子开关的实验装置

Fig. 1 Schematic experimental arrangement of optoelectronic GaAs switch

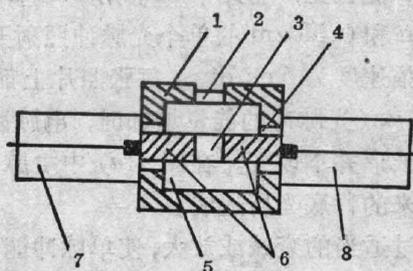
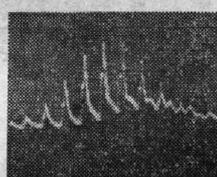


图 2 GaAs 光电子开关的结构

Fig. 2 The structure of the GaAs optoelectronic switch

材料切成 $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 的小立方体, 在一对侧面上做欧姆接触电极, 然后放在一个充有 20 个大气压氮气的高压室中, 高压室的一对引出电极与半导体表面上的电极相贴, 中间加一点锡以便更好地进行电接触。高压室是以特性阻抗为 50Ω 来设计的, 使其与两端的 50Ω 传输电缆有较好的匹配。这种结构的开关在万伏的直流偏压下也不会发生电极间的打火。实验中用 Tektronix 485 示波器观察开关的输出电压幅度, 用 Tektronix 7904 示波器拍摄波形。485 示波器的上升时间为 1 ns , 7904 示波器的上升时间为 0.7 ns , 在示波器之前使用的衰减器上升时间小于 1 ns , 也没有引起大的波形畸变。



(a)



(b)

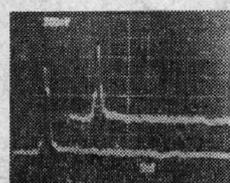
图 3 锁模脉冲序列照到 GaAs 开关上时, 开关输出的电脉冲波形

Fig. 3 The waveform of electrical pulses generated by GaAs switch when it was illuminated with a mode-locked pulse train

用 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 锁模序列脉冲照射开关时, 开关输出的电脉冲波形分别如图 3(a) 和 (b) 所示。扫描速度 10 ns/div , 脉冲间隔 9.3 ns 。从照片上可以看出, 电脉冲有很快的上升时间, 并且与光脉冲是同步的。就单个脉冲的宽度来说, 用 $1.06 \mu\text{m}$ 光照时, 输出电



(a)



(b)

图 4 单个锁模脉冲照到 GaAs 开关上时, 开关输出的电脉冲波形

Fig. 4 The waveform of electrical pulses generated by GaAs switch when a single ultrashort single mode-locked pulse illuminates it

脉冲的脉宽较宽,有几个 ns。用 $0.53\mu\text{m}$ 光照时,电脉冲很窄,小于示波器的响应。用 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 的单个光脉冲照射开关时,输出电脉冲的照片如图 4(a) 和 (b) 所示。水平扫描速度为 5 ns/div 。每张照片上都记录了两次不同光能量下的电波形。可以看出,当 $1.06\mu\text{m}$ 光脉冲的能量增加时,电脉冲也变宽。但是偏置电压从几千伏变到几百伏,电脉冲的波形并不改变。在图 4(a) 中主脉冲前的两个小脉冲是因为选脉冲开关消光比不够而漏过来的背底光所造成。

通过适当的衰减或放大,使单脉冲能量从 10^{-8} J 逐渐增大到 10^{-3} J , 用不同能量的单脉冲照到开关上,在 485 示波器上观察输出电脉冲的峰值,从而得到激光能量与开关效率的关系曲线。实验中分别用 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 两种波长,并在不同的偏压下测量,结果见图 5。纵坐标为开关效率,横坐标为光脉冲能量。(a) $\lambda=0.53\mu\text{m}$, $V_0=95\text{ V}$; (b) $\lambda=0.53\mu\text{m}$, $V_0=1850\text{ V}$; (c) $\lambda=1.06\mu\text{m}$, $V_0=93\text{ V}$; (d) $\lambda=1.06\mu\text{m}$, $V_0=1170\text{ V}$ 。其中开关效率是这样定义的:

$$\eta = \frac{2V_L}{V_0}, \quad (1)$$

这里 V_0 是开关输入端的偏压, V_L 是输出电压。图 5 中的曲线表明,开关对 $1.06\mu\text{m}$ 的光比较灵敏, $60\mu\text{J}$ 的光脉冲就能达到 90% 的开关效率,如果光脉冲能量增大到几百 μJ , 开关效率可达 95% 左右。对于相同的效率,用 $0.53\mu\text{m}$ 光脉冲光照时需要的能量比用 $1.06\mu\text{m}$ 光照时大近百倍,在几个 mJ 的光脉冲作用下,开关效率在 80% 左右,能量再大,

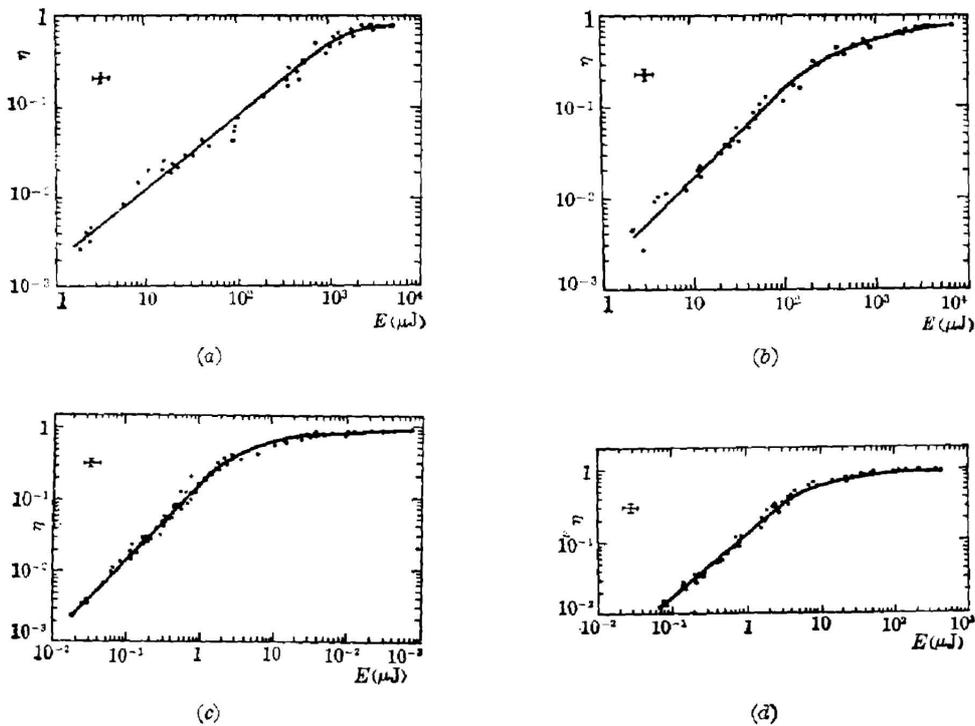


图 5 GaAs 开关的效率与激光能量的关系曲线

Fig. 5 The relation curve of GaAs switching efficiency versus laser pulse energy

就会损坏半导体材料的表面晶格。从图中还可看出,几条曲线的形状基本相似,在开关效率小于 40% 时,效率和能量的关系在对数纸上为直线,但是用 $1.06 \mu\text{m}$ 光照时直线的斜率略大于用 $0.53 \mu\text{m}$ 光照时的斜率。在开关效率超过 40% 之后,直线开始弯曲,随着激励光脉冲能量的继续增加,曲线斜率趋向于零,开关效率达到一个最大值。

在本实验中,给砷化镓开关加上的最高偏压为 2300 V,在 $130 \mu\text{J}$, $1.06 \mu\text{m}$ 锁模光脉冲作用下,开关输出电脉冲的峰值为 1060 V,开关效率在 92% 左右。

三、分 析

我们先来解释光脉冲能量和开关效率曲线的形状。根据传输线理论,当光脉冲照射到半导体表面时,开关输出电脉冲的电压由下式决定:

$$V_L(t) = V_0 Z_0 [2Z_0 + R_c + G^{-1}(t)], \quad (2)$$

这里 Z_0 是传输线的特性阻抗, R_c 是接触电阻, $G(t)$ 是开关的电导。在 Z_0 和 R_c 确定之后,开关的输出完全由 $G(t)$ 决定。对于边长为 a 的半导体立方体,在一面受到光照的时候,如果近似的认为光生载流子是成对产生的,电子和空穴的迁移率是常量,那末可以推出下式:

$$G(t) = \frac{(\mu_e + \mu_p)e}{a^2} P(t), \quad (3)$$

这里 e 是电子电荷, μ_e , μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, $P(t)$ 是半导体内空穴总数。从前面的公式中可以看出,当电导很小,即 $G^{-1}(t) \gg Z_0 + R_c$ 时, $V_L(t) \propto G(t) \propto P(t)$, 所以开关效率和光能量的关系在对数纸上为直线,直线的斜率为 1。随着光能量的增加,当 $G^{-1}(t)$ 下降到可以与 $(Z_0 + R_c)$ 相比拟时,直线开始弯曲,当 $G^{-1}(t) \ll Z_0 + R_c$ 时,曲线斜率趋于 0。另外,用 $1.06 \mu\text{m}$ 的光照射时,直线部分的斜率略大一些,这是因为有双光子吸收的成分。但是,当光脉冲能量小于 $2 \mu\text{J}$, 光强小于 $1 \text{MW}/\text{cm}^2$, 这时的双光子吸收不起重要作用,所以直线斜率略大于 1。

对于实验中因波长不同而引起的砷化镓光电导特性的差别可以这样来解释,材料对不同波长的光吸收系数不同,对 $0.53 \mu\text{m}$ 光有强烈吸收,光生载流子集中在表面,表面散射和载流子之间的散射会减小迁移率,表面复合和体内的辐射复合, Auger 复合将缩短载流子寿命。下面来作半定量的估算。载流子的复合可以表达为: $dp/dt = -AP - BP^2 - CP^3 - S/\delta$, 这里 A 、 B 、 C 分别为与载流子浓度一次方,二次方和三次方有关的复合系数, S 是表面复合系数, δ 是载流子到表面的平均距离,对于本征型半导体而言, δ 也等于吸收深度。这时载流子的寿命由下式决定:

$$\tau = (A + BP + CP^2 + S/\delta)^{-1}. \quad (4)$$

影响载流子迁移率的因素主要有表面散射,电子散射,杂质散射和晶格散射。因表面散射引起迁移率的下降由下式决定^[7]:

$$\mu_f = \mu_B / [1 + (l_B/\delta)], \quad (5)$$

这里 μ_f 是表面散射引起的平均迁移率, μ_B 是体内迁移率, l_B 是平均自由程。电子和杂质散射对迁移率的影响由文献[8]给出。还有,砷化镓材料中的迁移率与温度 T 成反比^[7],而材料表面的瞬时温升可简单地用下式估计:

$$\Delta T = \frac{E(\hbar\omega - E_g)}{4.18\hbar\omega c d a^2 \delta}, \quad (6)$$

这里 E 是光脉冲能量, $\hbar\omega$ 是光子能量, E_g 是禁带宽度, c 是比热, d 是质量密度, a 和 δ 意义同前。砷化镓材料的参数是: $A \approx 5 \times 10^7 \text{ sec}^{-1}$ [9], $B \approx 3 \times 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ [10], $C \approx 10^{-31} \text{ cm}^6 \cdot \text{sec}^{-1}$ [11], $S \approx 2 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ [12], $c = 5.46 \times 10^{-3} \text{ cal}/^\circ\text{K}$, $d = 5.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 所用样品 $a = 0.2 \text{ cm}$, 掺杂浓度 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

1. $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $E = 100 \mu\text{J}$

这时, 吸收系数 $\alpha = 3 \text{ cm}^{-1}$, 双光子吸收系数 $K_\beta = 5.6 \text{ cm} \cdot \text{MW}^{-1}$ [13], 可以按公式 $I = I_0 \exp(-\alpha Z) / \{1 + (K_\beta I_0 / \alpha) [1 - \exp(-\alpha Z)]\}$ 算出吸收深度为 0.006 cm , 这里 I 是光强, I_0 是表面处晶体内的光强, Z 是代表深度的变量。用(6)式估算出温升只有几度, 对迁移率的影响可忽略, 从文献[7]的表3、4中可查出平均自由程 $l_B \approx 0.7 \mu\text{m}$, 因为 $l_B \ll \delta$, 根据(4)式可知表面散射的影响也可忽略。这时载流子的平均密度约为 10^{18} cm^{-3} , 从文献[8]中可查出 $\mu_e \approx 3 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ 。在考虑各种复合过程之后, 可以根据公式(4)估算出载流子寿命约为 2 ns 。

2. $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$, $E = 100 \mu\text{J}$

这时只有单光子吸收, 吸收系数 $\alpha = 8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, 代入公式 $I = I_0 \exp(-\alpha Z)$ 解得吸收深度为 $0.13 \mu\text{m}$, 估计载流子密度达 10^{20} cm^{-3} , 从文献[8]中可查出 $\mu_e \approx 2.5 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ 。这时温升可达 1000°K , 则 μ_e 将下降为 $600 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ 。再代入公式(5)考虑表面散射的影响后得出电子的平均迁移率只有 $100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-2}$ 左右。这时估算出的载流子寿命均为 20 ps 。

在上面的估算中, 虽然有的数据不很确切, 但可以看出, 用 $0.53 \mu\text{m}$ 光照射, 由于吸收系数大, 载流子密集于表面, 载流子寿命要缩短两个量级, 迁移率也比用 $1.06 \mu\text{m}$ 光照时下降几十倍, 从而使开关需要的激光能量增加, 输出的电脉冲变窄。在本实验中, 达到的最大开关效率为 96% , 需要的激光能量也比理论估计值大, 原因是半导体材料与电极之间有接触电阻, 测量上的误差对此也有影响, 根据实验中的条件估计, 能量测量误差约为 $\pm 30\%$, 电测量误差约为 $\pm 10\%$ 。

本实验是在邓锡铭研究员和余文炎副研究员的指导下进行的, 半导体工艺方面的工作由王海龙、朱筱春、曹根娣同志协助, 硅光电探测数字显示仪由周复正、甘柏辉同志提供。在此, 作者表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] D. H. Auston; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**, No. 3 (Feb), 101.
- [2] Chi. H. Lee; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, No. 2 (Jan), 84.
- [3] F. J. Leonberger, P. F. Moulton; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, No. 9 (Nov), 712.
- [4] D. H. Auston; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**, No. 1 (Jan), 66.
- [5] P. S. Mak, V. K. Mathur *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **32**, No. 3 (Mar), 485.
- [6] P. R. Smith, D. H. Auston *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **30**, No. 1 (Jan), 47.
- [7] Helmut Wolf; *Semiconductors*, (John Wiley and Sons, New York 1971) 401, 283.
- [8] B. T. Debye, P. R. Jay; *Solid-State Electronics*, 1980, **23**, No. 7 (July), 773.
- [9] C. J. Hwang; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**, No. 11 (Oct), 4408.

- [10] H. C. Casey, Jr.; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 2 (Feb), 631.
 [11] G. Benz Conradt; *Phys. Rev. (B)*, 1977, **16**, No. 2 (Jul), 843.
 [12] C. A. Hoffman, H. J. Gerritsen; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, No. 3 (Mar), 1603.
 [13] S. Jayaraman, C. H. Lee; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, No. 10 (May), 392.

Optoelectronic GaAs switch controlled by mode-locked laser pulses

ZHU XINMING CHEN LANRONG AND ZHI TINGTING

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

(Received 3 November 1981, revised 16 August 1982)

Abstract

A Cr-doped semi-insulating GaAs cube was used as the optoelectronic switching element. Using the ultrashort pulses at $1.06 \mu\text{m}$ or $0.53 \mu\text{m}$ to control this switching element, its output characteristics was observed and the dependence of the switching efficiency on the laser energy was obtained. The behaviour of the photoconductivity at high pumping level was analysed.

(上接第 275 页)

波段 ($1.3 \mu\text{m}$) 光纤传播问题。现在正集中研究单模光纤的有关问题, 例如会上有多篇关于单模光纤散的射特性和偏振特性的文章。

(7) 微微秒光学引起了到会代表的广泛兴趣, 会场设在一个大厅里。会上发表的文章有十多篇, 内容包括对超高速光电导器件的研究, 例如 InP:Fe 光电导器件, 其载流子寿命短于 100 微微秒。用 InP、InGaAsP 材料制成的半导体激光器可产生脉冲宽度达 $1.4 \sim 2.0 \text{ ps}$ 的激光输出。贝尔实验室在微微秒光学方面居领先地位。他们还报导已获得了具有持续时间短于 80 fs , 功率在千兆瓦量级和光谱范围在 $0.19 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的连续脉冲。

会议期间还举行了玻尔百周年纪念会, E. Wolf 等知名学者在会上作了纪念性报告; 组织了“高密度光存储”、“集成光学”、“现代光学测量”等 9 个专题的短课程; 分别举行了 11 个光学技术组会议, 包括光学材料和薄膜技术、光学加工和测量、原子光谱和光学物理、激光、颜色、视觉、信息处理和全息技术、大气光学、光学设计、天文、航空和宇航光学、医用光学等; 以及组织了对设在图森的著名光学科学中心及 Kitt Peak 天文台的参观活动。

在会议同时还附有一个展览会, 展出了 70 家公司和单位的约 70 项展品。

(李淳飞)