

GaAs 微微秒光导开关的研究

潘家齐 吕福云 袁树忠 李晓民

(南开大学电子科学系 天津 300071)

庄婉如

(国家集成光电子学联合实验室 北京 100083)

摘要 采用离子注入高纯 LEC GaAs 材料,设计研制了共面线和微带线两种结构微微秒 (ps) 光导开关。其输出电脉冲响应时间 FWHM 为 8—10ps, 当光强为 1mW 时,电脉冲幅度为 0.2V。

EEACC: 4250

1 前言

随着光通信技术,快速信息处理技术及微波技术的发展,大量高速电子器件,光电子器件及高速集成电路不断涌现^[1],如异质结 AlGaAs/GaAs 双极晶体管 (HBT) 响应速度已达 15ps, 超晶格结构光探测器响应时间约 10ps, 超高速 GaAs IC 平均门延迟时间达 5.8ps, 对材料瞬态特性研究也进入皮秒 (ps) 领域。传统时域测量技术如取样示波器(最快上升时间 25ps) 等已无法适应测量要求。超高速光电(电光)采样技术做为新的时域测量手段^[2],自八十年代以来发展迅速。我们研制的超高速光电采样系统^[3],由于它的良好信噪比和测量灵敏度高而获得广泛应用。

微微秒光导开关是做为该系统的高速采样门和超短电脉冲发生源。我们曾研制了 SOS (Silicon on Sapphire) ps 光导开关,其输出电脉冲的半强宽 FWHM~5ps, 但灵敏度较低 ($\mu\text{V}/\text{mW}$)。为进一步提高 ps 光导开关灵敏度,我们又研制了 GaAs 光导开关。在国外研制的光电采样系统中,做为高速采样门的 ps GaAs 光导开关响应时间已达 3—5ps., ps SOS 光导开关的响应时间已接近 1ps。中国科学院上海光机所研制单缝 GaAs 光导开关,电脉冲前沿上升时间(10—90%)已达 2.6ps。本文对我们研制的 ps GaAs 光导开关工艺和结构设计以及实验结果进行分析和探讨。

2 高速光导开关的工作原理

高速光导开关的基本原理如图 1 所示。

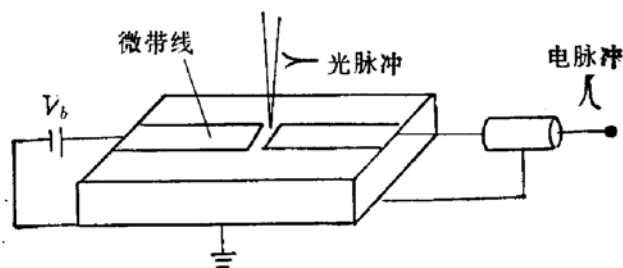


图1 光导开关原理图

超高速光导开关是采用具有高缺陷密度，载流子寿命极短的半导体材料制成的。当超短激光脉冲照射到狭缝上时，产生光生载流子，狭缝电导变大，开关闭合，电流通过狭缝传导。由于光生载流子寿命极短，很快被复合，开关重新回到断开状态。这样微带传输线上产生一个脉冲电压信号。脉冲电压的上升时间由光脉冲的上升时间和开关电路的 RC 时间常数决定。（ R 为传输线阻抗， C 为开关狭线间电容）信号下降时间由光生载流子的寿命 τ 决定。脉冲幅度正比于开关的偏置电压，光强和载流子迁移率。脉冲电压信号可用下式表示：

$$\begin{aligned} V(t) &= R_0 I(t) = 2R_0 E_B A q \mu n_0 \exp(-t/\tau) \\ &= V_0 \exp(-t/\tau), \end{aligned}$$

信号幅度 $V_0 = 2R_0 E_B A q \mu n_0$

其中 $n_0 = n_n = n_p$ 为光生电子和空穴密度， μ 为载流子迁移率， R_0 为负载电阻， $E_B = \frac{V_B}{L}$ ， V_B 为狭缝上偏置电压， L 为狭缝宽， A 为电流流过的截面积， q 为电子电荷。

3 GaAs 开关的设计和工艺

光电导开关取样门是高速采样测量系统的关键部件，其响应时间决定采样系统的时间分辨率。开关灵敏度决定系统的测量灵敏度。系统的主要噪声也来自取样门。因此，如何制做出高开关速度，高灵敏度、低噪声的光导开关是提高采样系统性能的关键。

3.1 结构设计

设计的共面线和微带线两种光导开关的电极结构示意图如图2所示。

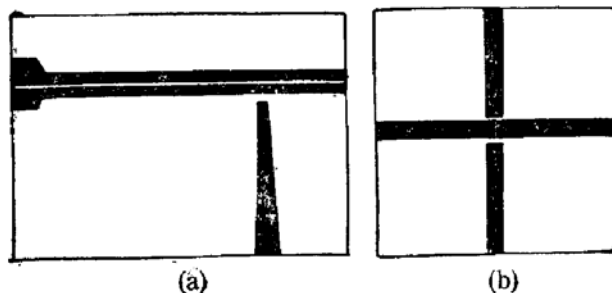


图2 GaAs 光导开关电极结构

(a) 共面线结构 (b) 微带线结构

考虑到我们的工艺条件和实验条件，开关结构尺寸如下：

共面线结构: 输出阻抗 $z_0 = 90\Omega$, 衬底厚 $h = 500\mu\text{m}$, 两条共面线各宽 $15\mu\text{m}$, 共面线间距为 $10\mu\text{m}$, 长 20mm , 采样开关狭缝 $10\mu\text{m}$, 宽 $30\mu\text{m}$.

微带线结构: 输出阻抗 $z_0 = 70\Omega$. 衬底厚 $h = 500\mu\text{m}$, 狭缝宽为 $10\mu\text{m}$, 微带线宽为 $200\mu\text{m}$.

可以估算光导开关的电路参数对其响应速度的影响. 当开关尺度远远小于产生的电脉冲的波长时, 可用集总参数电路来等效. 在以上的电极结构中, 分别有两个工作狭缝, 一个做为电脉冲发生器, 一个当做取样门.

共面线的电脉冲产生开关及取样开关的等效电路如图 3(a)(b) 所示.

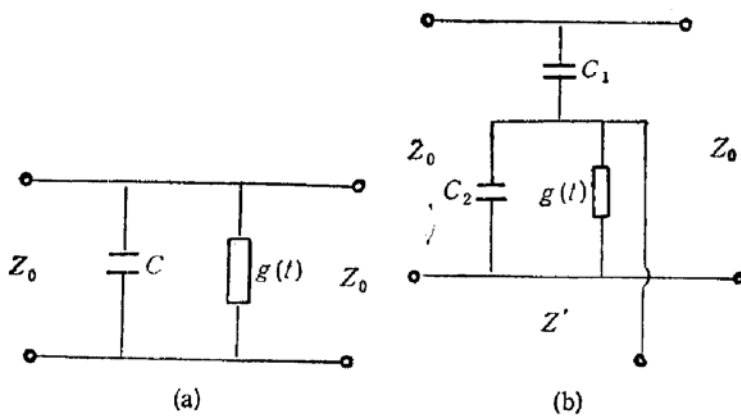


图 3 共面线开关等效电路
(a) 产生开关 (b) 取样开关

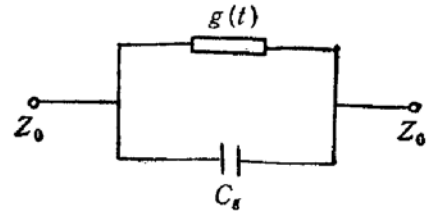


图 4 微带线开关等效电路

其中 $g(t)$ 为光电导, C 光点照射处电容, C_1 取样微带电容, C_2 共面线两线间电容, Z' 为取样微带的阻抗.

微带线的电脉冲产生开关与取样开关等效电路相同如图 4 所示. 图中 $g(t)$ 为光电导, C_g 为狭缝间电容.

经计算^[4]可以得到两种开关电路的时间常数的表达式.

共面线结构产生开关的时间常数: $\tau = \frac{1}{2} Z_0 C_{sc}$, 其中 $C_{sc} = C \cdot L_d$. C 为共面传输线单位长度电容, L_d 为光点直径. 对我们的设计参数: $Z_0 = 90\Omega$, $C = 0.93\text{pF/cm}$, $L_d = 25\mu\text{m}$. $C_{sc} = 0.0023\text{pF}$, 则 $\tau = 0.1\text{ ps}$.

共面线取样开关的时间常数:

$$\tau = 1 / \left(\frac{2}{Z_0 C_1} + \frac{2}{Z_0 C_2} + \frac{1}{Z' C_2} \right) \text{ 当 } Z_0 = 90\Omega \text{ } Z' = 300\Omega$$

$$C_1 = C_2 = 0.005\text{ pF 时, } \tau \sim 0.1\text{ ps.}$$

我们研制的光导开关的响应时间为 $8\text{--}10\text{ps}$, 因此, 共面线电极结构的电路参数对开关响应时间的影响可以忽略不计.

对微带线电极结构, 开关缝间电容 $C_g \sim 0.03\text{pF}$ (在 12GHz 时计算结果). 它的产生开关的时间常数 $\tau = 1 / \left(\frac{1}{2Z_0 C_g} + G_0 / C_g \right)$. 它的取样开关的时间常数 $\tau = 1 / \left(\frac{3}{2Z_0 C_g} + G_0 / C_g \right)$. 当 $Z_0 = 70\Omega$, $C_g = 0.03\text{pF}$ 时, 估算出产生开关时间常数 $\tau \simeq 3\text{--}4\text{ ps}$. 取

样开关时间常数小于产生开关的时间常数。

由以上计算可知,单从开关结构电路参数的影响看,共面线结构优于微带线结构。但微带线结构工艺简单,可方便地与同轴传输线相连,便于应用。因此微带结构有更广泛的应用前景。

3.2 工艺流程

制做 GaAs 光导开关的工艺流程如下:

GaAs 片抛光清洗→光刻→带胶蒸发形成金属电极→去胶→合金化→质子轰击→划片。

基片采用 LEC 高纯 GaAs 片,电极材料为 Ni/Ge/Au。合金化温度 420℃,时间 2 分钟。电极厚度为 1000 Å。质子轰击能量 200keV,剂量为 $3.0 \times 10^{14}/\text{cm}^2$,轰击角度 10° 。并对不同质子注入的能量,剂量和注入角进行了实验和比较。

4 实验结果与分析

采用我们研制的超高速光电采样系统测量 GaAs 光导开关的特性。图 5 为该示意图。

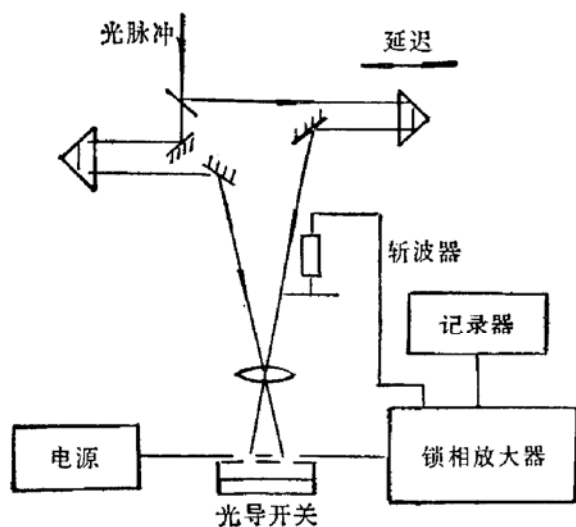


图 5 光电采样系统示意图

如果用 $V_1(t)$ 表示光导开关产生的电脉冲信号, $V_2(t)$ 表示取样开关的取样函数, 则锁相放大器输出的信号可简单表示为:

$$S(\tau) = \kappa \int_{-\infty}^{\infty} V_1(t) \cdot V_2(t + \tau) dt.$$

为一互相关曲线, κ 为与系统有关常数, τ 为激发光脉冲与取样光脉冲间的时间延迟。

图 6 给出测得的两种结构开关的互相关曲线。其离子注入条件为: 注入剂量: $3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, 注入能量: 200keV, 注入角: 10° 。测量条件为激光脉冲宽 3ps, 波长

6000 Å。照射光平均功率 1mW。直流偏置电压为 22.5V。

从相关曲线可以确定光导开关的响应时间和产生的电脉冲幅度。

首先分析如何确定开关的响应时间。影响最后电脉冲相关曲线的因素有三个, 光脉冲宽度及形状; 材料光生载流子寿命; 开关的狭缝电容与传输线组成的电路系统。对共面线开关, 它的电路参数影响可以忽略, 则激发开关和取样开关的波形只由光脉冲和材料的特性决定, 也即产生电脉冲的形状和取样函数都与开关光电导变化一致。因此测得的曲线应是一个对称的自相关曲线。但实验中得到的曲线是非对称的, 这是由于电脉冲在传输线上的反射引起的脉冲叠加造成的。因此在确定开关响应时间时, 取相关曲线上沿对称映象, 形成一对称相关曲线, 从曲线上得到其响应时间为 10—12ps, 扣除光脉冲影响

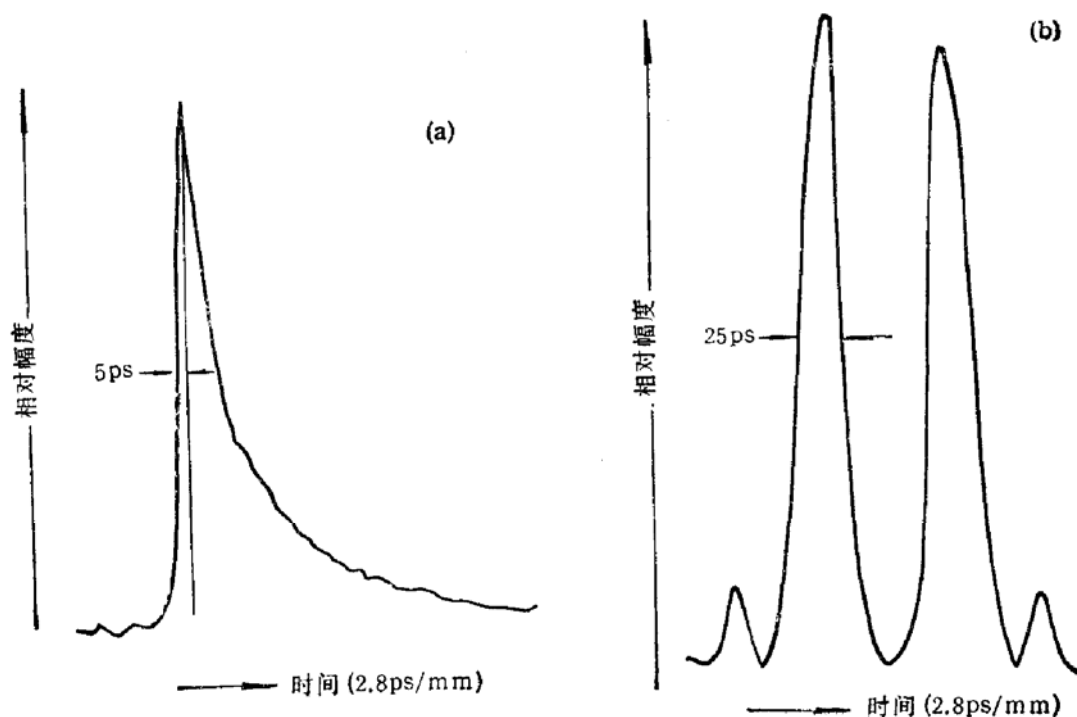


图6 光导开关互相关曲线
(a) 共面线结构 (b) 微带线结构

得器件响应时间为 8—10ps。微带线开关器件响应时间更慢一些,但不拖尾巴。由于微带线开关缝间电容较大,导致产生开关与取样开关脉冲形状有差别,相关曲线在没有反射干扰情况下也存在不对称性。用减薄基片方法可改善电路 RC 时间常数,提高器件的响应时间。与共面线开关相比较,在材料和工艺条件相同情况下,相关曲线上升沿上升时间差别大于 10ps。

开关所产生的电脉冲的幅度可由相关脉冲幅度来计算。设所产生的电脉冲为 $V(t)$, 取样波形为 $g(t)$, 取样电极上产生电荷表示为:

$$\vartheta(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(t - \tau) \cdot g(t) dt.$$

如取样频率为 f , 则取样电极上产生的电流为 $f \cdot \vartheta(\tau)$ 。相关脉冲曲线为 $S(\tau) = f \cdot \vartheta(\tau) \cdot R$ 。 R 为锁相放大器输入阻抗与取样开关等效电阻的并联值。当 $V(t)$ 为一常数 V_0 时,取样开关产生的光生电流为开关在恒定偏压 V_0 下的光电流。

$$I_0 = f \cdot \vartheta(\tau) = f \cdot \int_{-\infty}^{\infty} V_0 g(t) dt = f \cdot V_0 \int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt.$$

I_0 可从实验中测得。如相关脉冲曲线为一自相关曲线,即 $V(t) = K_g(t)$, 并且 $V(t)$ 的最大值为 $V_{\max}$ 则相关曲线的最大值 $S_{\max}$ 为:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= f \cdot \vartheta(0) \cdot R = f \cdot R V_{\max} \cdot \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt \\ &= (1/2) \cdot (V_{\max}/V_0) \cdot R \cdot I_0. \end{aligned}$$

由此得到开关产生的电脉冲的峰值电压为

$$V_{\max} = S_{\max} \cdot V_0 \cdot 2 / (R \cdot I_0).$$

用所测得的一组数据 $I_0 = 10 \mu A$, $V_0 = 22.5 V$, $R = 500 k\Omega$, $S_{\max} = 23 mV$ 。代入得

$$V_{\max} \approx 0.2V.$$

5 结论

1. 我们研制的质子轰击的高纯 GaAs 光导开关在光脉冲宽为 3ps 的激光激发下, 其响应时间的 FWHM 为 8—10ps. 当光强平均功率 1mW, 开关偏置电压 22.5V 时输出电脉冲峰值电压为 0.2V.

2. 开关的响应时间依赖于材料的载流子寿命同时受开关电路时间常数和光脉冲宽制约. 现正在改进开关结构设计, 使开关的电路时间常数的影响减到最小. 并着手改造光源使光脉冲宽达飞秒(fs).

3. 光导开关光生载流子寿命有一个极限, 它与材料中缺陷饱和相对应. 对高能质子轰击的高纯 GaAs 材料, 这一极限为 0.6ps, 但随缺陷密度增加, 缺陷间跳跃电导加大, 使开关暗电流增长. 因此, 在设计 GaAs 开关时, 通过选择质子注入的剂量和注入角来控制光生载流子的寿命值不小于 1ps. 它成为该光导开关响应时间的极限值.

GaAs 光导开关制作工艺简单, 并且与 GaAs 高速集成电路及微波集成电路工艺相容. 可将它们集成在一起. 用 GaAs 光导开关测量电路和器件的时域特性, 可以大大减少高频电信号色散失真的影响.

参 考 文 献

- [1] C. H. Lee, IEEE Trans. Microw Theory Tech., 1990, MTT-38(5): 683.
- [2] Nicholas G. Paulter, A. J. Gibbs and Dipen N. Sinha, IEEE Trans. Electron Devices, 1988, ED-35(12): 2343.
- [3] X. Guan, S. Yuan F. Lu, J. Pan, Y. Li and G. Ren, Proc. SPIE, 1990, 1230:177.
- [4] DH Auston, IEEE J. Quantum Electron., 1983, QE-19(4):639.

Study of ps GaAs Photoconductive Switch

Pan Jiaqi, Lü Fuyun, Yuan Shuzhong and Li Xiaomin

(Department of Electronics Science Nankai University Tianjin 300071)

Zhuang Wanru

(National Integrated Optoelectronics Laboratory Beijing 100083)

Abstract Adopting the ion-implanted high-pure LEC GaAs materials, we have developed some photoconductive switches which were on a microstrip transmission line or on a coplanar transmission line. The duration of generated electrical pulses was about 8—10ps. The amplitude was about 0.2V when the exciting optical power was 1mW.

EEACC: 4250

Received 6 January 1993, revised manuscript received 18 March 1993