

外部电光测量的空间分辨率^{*}

张红波¹ 王 瑞¹ 陈开鑫¹ 杨 穗¹ 张大明¹ 衣茂斌¹ 王国全² 马振昌²

(1) 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

(2) 专用集成电路国家重点实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

摘要: 报道了用 650nm 的半导体激光二极管建立的一个正面入射式外部电光测量装置。用〈100〉面镀红光全反射膜的半绝缘 GaP 作为外部探头, 提出以有效调制电压为测量对象, 对外部电光测量装置进行了电场空间分辨率的测量。实验结果表明, 电场空间分辨率小于 1μm, 电压灵敏度为 12.6mV/ √Hz。

关键词: 外部电光测量; 电场空间分辨率; 半绝缘 GaP

PACC: 7820J; 4280

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)07-0752-05

1 引言

已证明电光探测^[1,2]技术是一种时域无侵扰检测集成电路内部动态特性的有效技术。它利用晶体的 Pockel's 效应, 用激光作为载体把集成电路中的电场信号调制到光频。外部电光探测技术因其克服了内电光探测对衬底的依赖性, 并在高速电路测试上具有十分重要的价值而成为近年来受到高度重视的一种宽带在片检测技术。外电光探测是用电光晶体制成微小的电光探头, 使电光探头能接近或放置在被测器件表面, “浸”在被测电路的电场中, 从而能把电场信息转化为光信息, 因而可以对任意衬底未封装的二维集成电路内部任意节点的动态特性进行无触点的测量。这为集成电路的设计和模拟提供了重要的原始数据和实验验证, 也可以在生产中作为工艺监测的辅助手段和故障判断之用。作为外部电光探头的材料有以 LiNbO₃^[3] LiTaO₃ 和 KDP 为代表的铁电晶体, 但这些材料介电常数大, 很难实现对集成电路的无侵扰测量; 还有以 GaAs 为代表的 III-V 族半导体材料, 但 GaAs^[1,2,4]透光波长在红外区。目前所报道的外部电光采样仪的探头大都采用波长为 1.3μm 左右的激光器, 给观察和测量带来不便, 并且

系统的光学空间分辨率难以达到亚微米^[5], 这就极大地限制了仪器的应用范围。本论文作者首次采用 650nm 的红光激光二极管建造了一个正面入射式外部电光测量装置, 比用 1.3μm 的激光器提高了空间分辨率。因为半绝缘 GaP 的透明波长上限为 0.55μm, 介电常数为 10< 12.3(GaAs), 降低了对待测电路的影响, 所以我们采用下表面镀红光全反射膜的半绝缘 GaP 作电场传感器^[6], 比用 GaAs 作探头降低了约一半的半波电压。目前报道的各种外部电光采样仪对空间分辨率的定义说法不一, Yang 等定义最小可测量信号线宽的一半为仪器的空间分辨率^[7], 并用这种方法得到了 8μm 的空间分辨率; Mitsu Shingagwa 等人定义光斑大小为空间分辨率^[8], 其系统的空间分辨率为 2μm, 考虑到我们测量到的信号是高斯光束与电场分布的卷积, 我们提出以有效调制电压为测量对象来定义外部电光测量装置的电场空间分辨率的方法。通过对宽为 3μm, 间隔为 2μm 的电极的测量, 我们得到了小于 1μm 的电场空间分辨率和 12.6mV/ √Hz 的电压灵敏度。

2 外部电光测量装置

我们在实验中所使用的正面入射式外部电光测

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69876014)

张红波, 男, 博士研究生, 主要从事半导体光电子学研究。

2001-10-14 收到, 2002-01-18 定稿

©2002 中国电子学会

量装置如图 1 所示, 其中的探头为沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向切割的半绝缘 GaP, 先减薄至 $150\mu\text{m}$, 再双面抛光, 单面镀多层 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质膜(约 $1.5\mu\text{m}$ 厚), 然后解理成适合待测电路大小的长方体。该介质膜对 650nm 波长的红光反射率大于 99.9%, 对大于 $1.0\mu\text{m}$ 波长的照明光反射率约为 35%, 这样既可以防止红光影

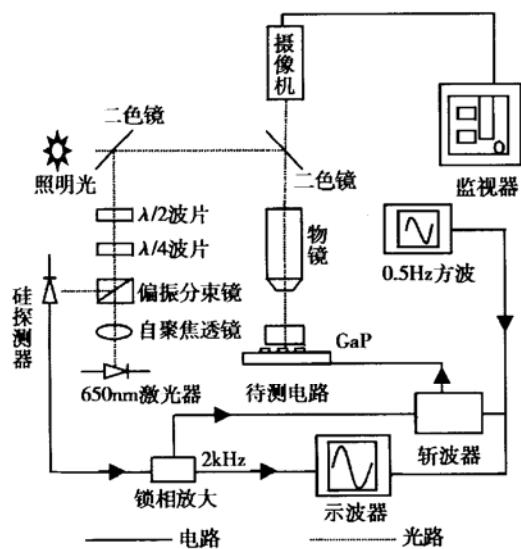


图 1 半绝缘 GaP 外部电光测量装置框图

Fig. 1 Schematic diagram of external electro-optic measurement equipment. The insulated GaP is free standing on the electrode.

响待测电路的工作状态, 又可以通过 CCD 摄像机清晰的观察电路图案。从 650nm 的激光二极管发出的探测光经过自聚焦透镜、偏振分束镜、 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片, 将入射的线偏振光变换为椭圆偏振光, 然后用物镜($\text{NA} = 0.65$)将光束通过 GaP 聚焦到下表面的高反射膜上, 然后再经过 GaP 晶体沿物镜、 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片、偏振分束镜到达 Si 探测器, 这样待测电极上电场对晶体内的激光进行强度调制, 转换成电信号后引入锁相放大器(Model 5209)。照明光为卤素灯泡, 经过两个二色镜的滤光, 只有 $\lambda > 1.0\mu\text{m}$ 的光透过物镜, 再经过 GaP 为电路提供照明。锁相放大器发出一个 2kHz 的正弦信号作为斩波信号对慢信号(0.5Hz 的方波)斩波, 同时作为锁相放大器的参考信号, 经过相干检测对微弱信号进行放大, 用存储示波器(HP545031A)和微机进行对波形的分析和存储。

3 实验原理及结果分析

3.1 测量原理的模拟及实验验证

图 1 所示的装置, 其调制深度为^[9]:

$$\frac{I_0}{I_i} \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\pi V}{V_\pi} \right) \quad (1)$$

式中 V_π 为半波电压; 对于背面入射的内电光测量, V 代表电极上的电势^[10], 但对于外部电光测量如图 2 所示, 考虑到探头与电极有一个空气缝, 及半绝缘 GaP 上表面电势不为零, 和高斯光束的发散, 所以 V 并不代表电极上的电势, 而是反映晶体内部纵向电场分布与高斯光束分布的相互作用, 我们不妨称之为有效调制电压, 此电压也是我们的模拟和测量的对象, 其表达式:

$$V(x_0, y_0) = \iiint E_z(x, y, z) \times \frac{A}{\omega^2(z)} e^{-2 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\omega^2(z)}} dx dy dz \quad (2)$$

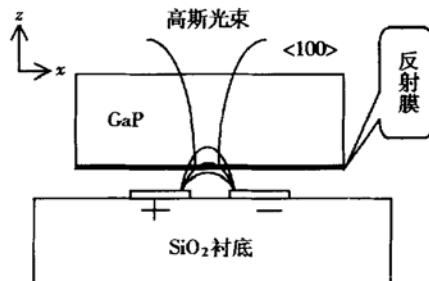


图 2 外部电光测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of external electro-optic measurement

按图 2 所示的坐标, 电极沿 y 方向设为无限长, 我们把 $x-z$ 平面分成等间距的正方形网格, 用有限差分法计算空间电势的分布, 然后计算 GaP 晶体内纵向电场强度的分布 $E_z(x, z)$, 最后以高斯光束的腰粗 ω 和 GaP 晶体为边界沿 Z 方向求 $E_z(x, z)$ 的积分, 用这种方法得到的结果近似为有效调制电压 $V(x)$ 。实验中我们在 SiO_2 上用光刻、溅射、剥离等工艺制作了宽为 $5\mu\text{m}$, 间距为 $120\mu\text{m}$ 的指状电极。在 ABCD 电极上接 5V 信号, abcde 电极接地, 并对其进行测量。我们知道任意时刻电力线从 ABCD 电极出发终止到 abcde 电极和无穷远处, 则同一时刻两侧电极上方探头内的纵向电场分量方向相反, 反映

到测量结果则会出现正负的差别,在示波器中能观察到二者在位相上相差 180° ,我们在测量和模拟中加正负号以示区别。计算与测量结果如图 3 所示,图中的点为测量值,曲线为计算机模拟结果。由此图可以看到,当衍射环中心从 a 移动到 e 的过程中,电光信号出现从正极大减小到零再到负极大的交替变化,且同电位的电极上信号的强度大小差不多,信号线上约为 6V 左右,地线为负 4.5V 左右,注意地线虽然电势为零,但此处测量信号并不为零,而是一极大值点,这也充分说明,外部电光测量并非测量电极的电势^[10],而是测量有效调制电压 V 。两侧电极的测量电压不相等说明有一部分电力线从信号线出发终止于无穷远,导致不同电极上电力线密度不相同,从图 3 可以看出,测量结果与计算机模拟能很好的吻合,为下面测量装置的电场空间分辨率打下实验基础。

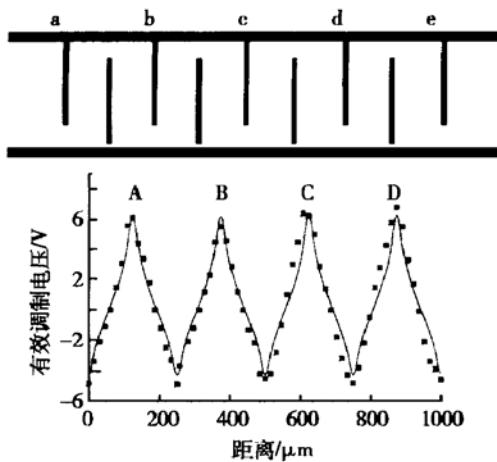


图 3 指状电极指的测量及模拟曲线

Fig. 3 Measurement and simulation curves of inter-digital electrode

3.2 电场空间分辨率的测量

由高斯光束的圆孔衍射可知,充分扩束的高斯光束经过一个物镜后其衍射斑直径为:

$$d = \frac{2\lambda}{\pi NA} \sqrt{1 - NA^2} \quad (3)$$

测量中我们采用 $40 \times 0.65NA$ 的物镜,这里 $\lambda = 650\text{nm}$, $NA = 0.65$,故 $d = 0.48\mu\text{m}$ 。但是光斑的大小并不代表实际的电场空间分辨率,这里把测量对象定为有效调制电压,我们定义电场空间分辨率为空间最小可分辨的有效调制电压的变化,它不仅与探测光的光点大小有关,而且与探头的介电常数、系统

的电压灵敏度有关。要测量这一变化就需要一个微米级变化的电场,由于实验条件限制,我们制作了一个宽 $3\mu\text{m}$ 、间距 $2\mu\text{m}$ 的电极,我们对这样的电极产生的电场的电光测量结果进行了计算机模拟,并对其进行了测量,测量时一个电极加 5V 正信号,如图 1 所示。为了防止两个电极上的电力线密度不同,我们把从锁相放大器来的 2kHz 信号经过倒相器,再通过一个同样的斩波器,将 0.5Hz 的方波斩波后,最后送到另一个电极上。这样两个电极上任意时刻的电力线密度相同,方向相反,在两电极中心处产生了一个纵向电场的正负变化,模拟结果和测量结果如图 4 所示。我们把光环中心从正电极外边缘处开始测,每隔 $1\mu\text{m}$ 测一点,用示波器观察输出波形,把这时的波形定为正,可以明显看到波形从正 1.1 开始,逐渐减小,在两电极缝中间处测量信号被噪声淹没,信号的信噪比约为 1,此处的纵向电场为零(所以取这时的电压为噪声电压),然后波形变为倒相(图中用负号表示),绝对值逐渐变大,再把各点的测量电压加减噪声电压的一半作为测量误差,这样我们就得到一个曲线带。从图 4 中可以看到,在两电极缝中心处,光点横向移动 $0.5\mu\text{m}$ 时所得到的测量信号变化的大小和噪声电压相等,说明这种装置的电场空间分辨率最少应该小于 $1\mu\text{m}$ 。图 4 中的曲线为计算机模拟结果,点为测量的结果,可见测量与模拟结果符合的较好。对于空间分辨率的更进一步的测量正在进行之中。

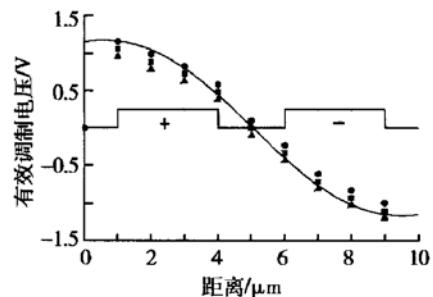


图 4 $2\mu\text{m}$ 电极间隔的测量和模拟

Fig. 4 Measurement and simulation curves of electrodes with a spacing of $2\mu\text{m}$

3.3 电压灵敏度的测量

测试装置的电压灵敏度是指测量信号与系统的噪声相等时被测电极的电压值,即最小可探测电压。系统的电压灵敏度和很多因素有关,对于不同的装置由于激光器的功率、探测器的响应度、探头与电极

的距离等因素影响,无法全面的计算不同装置的电压灵敏度的差别,实验时我们在2kHz的交流信号对0.5Hz的方波斩波时,对100 μ m宽的ITO波导进行了外部电光调制测量,通过降低调制信号的电压值,用示波器观察测量的波形,发现当信号的值为20mV时电光调制信号的信噪比约为1,由于噪声电压与信号探测带宽的平方根成正比,测量时锁相放大器的等效噪声带宽为2.5Hz,从而确定装置的电压灵敏度为12.6mV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。由于本装置采用正面入射,GaP晶体下表面与电极表面之间有一层高反射膜,所以要提高探测灵敏度,一是减少反射膜的厚度;二是寻找介电常数小的镀膜材料,以减少膜对电场分布的影响;三是用更大功率的激光器来提高入射光强;四是在GaP上表面镀增透膜以减少反射光的损失。

4 结论

我们采用650nm的红光激光二极管作为探测光,用下表面镀高反射膜半绝缘GaP作为外部电光探头,以有效调制电压为测量对象,进行了外部电光调制的电场空间分辨率的测量。我们得到了小于1 μ m的电场空间分辨率和12.6mV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的电压灵敏度。

参考文献

- [1] Vakdnibus J A, Mourou G. Subpicosecond electro-optic sampling: principles and applications. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, QE-22(1): 69
- [2] Heutmaker M S, Cook T B, Bosacchi B, et al. Electro-optic sampling of a packaged high-speed GaAs integrated circuit. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, 24(2): 226
- [3] Nagatsuma T, Shibata T, Sano E, et al. Subpicosecond sampling using a noncontact electro-optic probe. *J Appl Phys*, 1989, 66(9): 4001
- [4] Shinagawa M, Nagatsuma T. A laser diode-based picosecond electro-optic probe for high speed LSI's. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1992, 41(3): 375
- [5] David G, Bussek P, Auer U. Electro-optic probing of RF signals in submicrometre MMIC devices. *Electron Lett*, 1995, 31(7): 2188
- [6] Zhang Daming, Tian Xiaojian, Zhang Baijun, et al. Research of direct electro-optic modulating characteristics in GaP crystal. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(2): 168 (in Chinese) [张大明, 田小建, 张佰军, 等. GaP 直接电光调制特性研究. 半导体学报, 1999, 20(2): 168]
- [7] Yang K, Katehi L P B, Whitaker J F. Electro-optic field mapping system utilizing external gallium arsenide probes. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(4): 486
- [8] Shinagawa Mitsuru, Nagatsuma Tadao. An automated electro-optic probing system for ultra-high-speed IC's. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1994, 43(6): 843
- [9] Yariv A. Optical waves in crystals: propagation and control of laser. New York: John Wiley & Sons, 1984: 190
- [10] Kolner B H, et al. Electro-optic sampling in GaAs integrated circuits. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, QE-22(1): 79

Spatial Resolution in External Electro-Optic Measurement^{*}

Zhang Hongbo¹, Wang Rui¹, Chen Kaixin¹, Yang Han¹, Zhang Daming¹, Yi Maobin¹,
Wang Guoquan² and Ma Zhenchang²

(1 Jilin University Region, State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Changchun 130023, China)

(2 Jilin University Region, State Key Laboratory on Special Integrated Circuit, Changchun 130023, China)

Abstract: A front-side incident external electro-optic measurement mechanism is reported using 650nm semiconductor laser diode. A piece of semi-insulated GaP with high reflecting film for red beam in <100> direction is used as external probe tip. Measurement of the effective modulation voltage of the electrode indicates that the electric spatial resolution of the mechanism is less than 1μm, and the sensitivity the mechanism is of 12.6mV/ √Hz.

Key words: external electro-optic measurement; electric spatial resolution; semi-insulated GaP

PACC: 7820J; 4280

Article ID: 0253-4177(2002)07-0752-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(Grant No. 69876014)

Zhang Hongbo male, PhD candidate. He is engaged in the research on semiconductor optoelectronics.

Received 14 October 2001, revised manuscript received 18 January 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics