

背面直接取样结构电光取样的空间分辨率*

贾刚 陈占国 曹杰 衣茂斌 孙伟 高鼎三

(吉林大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室,
吉林大学实验区, 吉林, 长春, 130023)

摘要 介绍了电光取样系统空间分辨率的测量原理和方法, 实验结果表明, 建立的电光取样仪的空间分辨率为 $3\mu\text{m}$ 。
关键词 空间分辨率, 电光取样, 高斯分布。

SPATIAL RESOLUTION OF ELECTROOPTIC SAMPLING WITH BACK-DIRECT SAMPLING STRUCTURE*

JIA Gang CHEN Zhan-Guo CAO Jie YI Mao-Bin SUN Wei GAO Ding-San

(Department of Electronic Engineering, Jilin University,
National Integrated Optoelectronics Key Laboratory, Jilin University Region,
Changchun, Jilin 130023, China)

Abstract The principle and method for measuring the spatial resolution of electrooptic sampling systems were introduced. According to the experimental results, the spatial resolution of the electrooptic sampling instrument established by the authors is $3\mu\text{m}$.

Key words spatial resolution, electrooptic sampling, Gaussian distribution.

引言

电光取样技术是时序变换取样技术和超短光脉冲技术相结合而产生的高新技术, 联结它们的纽带是线性电光效应^[1]。在这种高新技术中, 光脉冲直接做为电光介质中的取样门, 它是以电光取样门和待测电路之间的电场耦合为基础, 所以不从电路中取出电荷就可以对高速集成电路内部迅变电信号进行检测。由于高速集成电路芯片上器件密度大, 探测光斑必须足够小, 才能避免电光串音, 进行有效探测。所谓电光串音是指芯片内不同点的不同电信号同时被探测光斑照射, 结果电光取样测得的信号是不同点的不同电信号叠加的结果。下面就我们建立的背面直接取样结构的电光取样仪的空间分辨率进行讨论。

1 空间分辨率的定义

对 GaAs 和 InP 材料做衬底的高速集成电路,

由于衬底材料是电光晶体, 并且电光取样和制造集成电路所需的晶向恰好一致, 所以可采用背面探测方式, 进行纵向直接取样^[1,2]。因为聚焦光斑直接照在待测点上, 聚焦光斑的大小决定了空间分辨率。空间分辨率定义为光斑的半极大全宽度 (FWHM) 的直径^[3], 记为 $D_{0.5}$, 也称为半功率或半辐照度直径。

我们选用的取样光脉冲源是 V 型沟结构的半导体激光器。从近场图和远场图的观测, 都可以认为它是 TEM_{10} 基横模振荡, 从而光束空间分布是高斯型的, 设相对辐照度为 e^{-2} 时, 半径为 W_0 的光束其总功率为 P_0 , 辐照度的测量从光束中心开始, 并垂直于传播方向 Z 进行。这样, 在直角坐标系中辐照度分布 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi W_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{W_0^2}\right] \quad (1)$$

根据 $D_{0.5}$ 和 W_0 的定义, 利用式 (1) 可证明, $D_{0.5}$ 和

* 国家自然科学基金 (编号 69676025) 资助项目
稿件收到日期 2000-01-11, 修改稿收到日期 2000-06-04

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69676025)
Received 2000-01-11, revised 2000-06-04

W_0 的关系为

$$D_{0.5} = 1.1774W_0. \tag{2}$$

2 光斑尺寸的测量原理

我们采用的方法是通过缓慢插入光束一个刀口后的光功率来确定光斑的大小^[3]. 刀口挡住了 $x \leq a$ 的所有点, 未被刀口挡住而通过其旁的功率 P 由下式给出:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \int_a^{\infty} I(x,y) dx dy = \frac{P_0}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2} a}{W_0} \right), \tag{3}$$

式(3)中 a 是插入光束刀口的深度, 所以, 从插进高斯光束的刀口旁通过的光, 其积分功率由余误差函数给出. 式(1)可以化成熟知的归一化高斯分布公式

$$\frac{I(x,y)}{P_0} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right). \tag{4}$$

式(4)中 σ 是数理统计中常用的标准偏差, 与 W_0 的关系为 $W_0 = 2\sigma$. 类似地, 式(3)可写为

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma} \right). \tag{5}$$

图1为归一化的高斯分布式(4)和余误差函数式(5)的曲线图. 从图1中可见, 相对积分功率为25%和75%的点分别位于高斯分布曲线极大值两侧, 这两点间距离等于可几误差 $e_p = 0.6745\sigma$ 的二倍. 所以, 由实验测得的积分功率与刀口位置的关系曲线便可直接得到 e_p 的值. 根据上述的讨论容易看出, 决定空间分辨率的光斑大小 $D_{0.5}$ 与 e_p 的关系为

$$D_{0.5} = 1.7456(2e_p). \tag{6}$$

3 测量系统

测量系统见图2. 半导体激光器发出的 $1.3\mu\text{m}$ 波长的激光束经自聚焦透镜准直后, 再用一个20倍的数值孔径 $\text{NA}=0.45$ 的显微镜物镜聚焦. 这套光路与电光取样仪中的光路一致. 经过焦点后光束开始发散, 再用一个聚焦透镜把所有在刀口旁透过的光全部会聚到光功率计的探头上. 刀口使用的是一个双面刀片, 被架在一个微动精度读数可达 $0.1\mu\text{m}$ 的微动台上. 微动台是用迈克尔逊干涉仪的微动台和一个微动架组合而成. 微动台可沿 Z 方向和垂直于 Z 的方向移动. 沿 Z 方向移动是为了寻找焦点, 可以不读数. 沿垂直于 Z 的方向移动是为了测量功率与刀口位置的关系曲线, 必须读数. 设这个方向为 X 方向.

4 测量结果

先把光用刀片全部挡住, 然后把刀口逐渐拉出, 利用光功率计监测透过的光功率随刀口位置的变化, 测得的曲线如图3所示. 测量过程中有 $1.3\mu\text{W}$ 的背景光必须扣除. 扣除背景光后, 由曲线可得相对功率为25%时刀口的位置为 $X_1 = 6.75\mu\text{m}$, 相对功

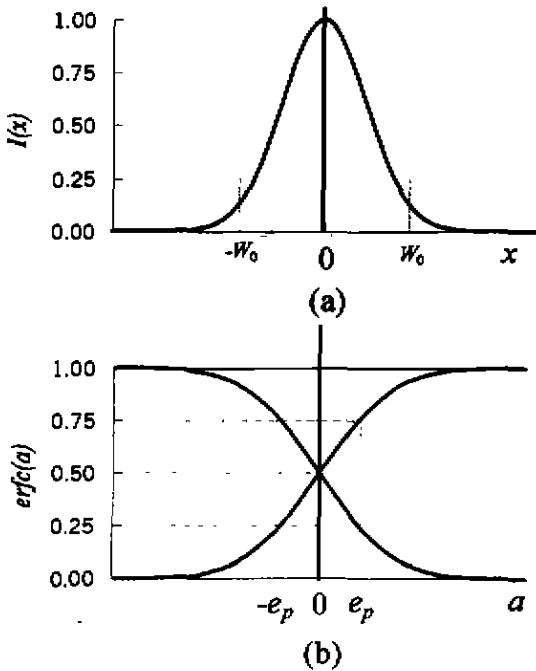


图1 归一化高斯分布和余误差函数曲线图

(a) 归一化高斯分布

(b) 相对功率与刀口位置关系

Fig. 1 Curves of normalized Gaussian distribution and complementary error function

(a) normalized Gaussian distribution

(b) relative power vs. position of edge

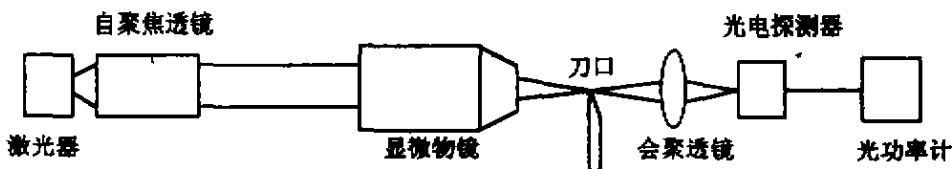


图2 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

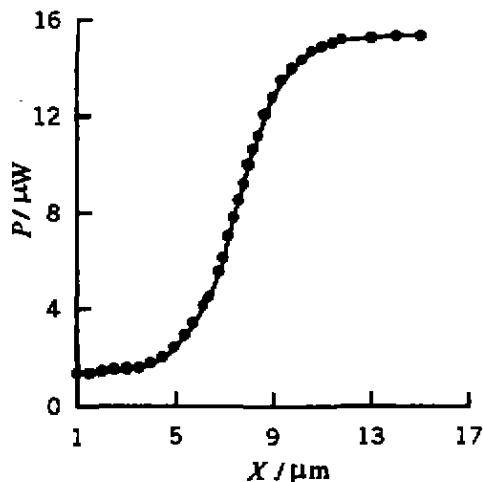


图3 光功率随刀口位置变化的实验曲线
Fig. 3 Measured curve of luminous power vs. position of edge

率为75%时刀口的位置 $X_2 = 8.50 \mu\text{m}$. 由此可知

$$2e_p = X_2 - X_1 = 1.75 \mu\text{m},$$

于是得半功率光斑直径为

$$D_{0.5} = (1.7456 \times 1.75) \mu\text{m} = 3.05 \mu\text{m},$$

所以我们的电光取样仪的空间分辨率可以确定为 $3 \mu\text{m}$.

同时,在使用电光取样仪进行集成电路芯片内部点测量时,通过红外摄像监视器观察,当光斑被移

到 $5 \mu\text{m}$ 的金属电极条背面时,光斑全部挡住. 这说明光斑直径小于 $5 \mu\text{m}$.

5 结果讨论

显微物镜由于夫琅和费圆孔衍射限制焦点的大小,所能达到的最小半功率直径为

$$d_{0.5} = \frac{\lambda \sqrt{1 - NA^2}}{2NA}, \quad (7)$$

式(7)中 λ 为波长. 我们所用波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 显微物镜的 $NA = 0.45$, 所以衍射极限半功率直径 $d_{0.5} = 1.29 \mu\text{m}$. 可见,我们的测量结果没有达到这个极限值. 这里的显微物镜是为可见光设计的,所以如果针对波长 $1.3 \mu\text{m}$ 重新设计镜头,对整个光路精心设计和调整,空间分辨率会进一步提高.

通过光斑大小的测量和实验观察,可以确定我们建立的电光取样仪的空间分辨率为 $3 \mu\text{m}$.

REFERENCES

- [1] Kolner B H, Bloom D M. Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits. *IEEE J. Quantum Electron*, 1986, QE-22(1); 79
- [2] Weingarten K J, Rodwell M J W, Bloom D M. Picosecond optical sampling of GaAs integrated circuits. *IEEE J. Quantum Electron*, 1988, QE-24(2); 198
- [3] Sirohi R S. *A Course of Experiments with He-Ne Laser*. New York; Hested Press, a Division of John Wiley and Sons, 1985, 11