

用激光探针测量半导体器件中的 载流子浓度调制效应*

江剑平 李艳和 武建平 许知止

(集成光电子学国家重点联合实验室 清华大学实验区
清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 本文采用 $1.3\mu\text{m}$ He-Ne 激光或 InGaAsP/InP 半导体激光作探针, 实时、无损地测量硅半导体器件中的自由载流子浓度的变化。从理论上分析了器件内自由载流子浓度变化引起的折射率改变及由此产生的光相位调制。它适用于硅和砷化镓材料的电子和光电子器件。本方法也显示了在测量集成电路内部有源器件特性方面的潜在应用前景。

PACC: 4260, 0760L, 7220

1 引言

随着高速半导体器件和集成电路的发展, 必须相应解决测试技术问题。传统的电学测量方法中, 机械探针的使用对被测电路芯片的工作状态有影响, 寄生参量的引入难以检测高频信号, 尤其是无法探测集成电路芯片内部某一器件或结点的参数变化。为此, 人们一直在探索用于集成电路的光探针无损检测技术。GaAs 是一种电光晶体材料, 器件内部的电场会使通过的光产生双折射, 利用这种 Pockels 效应可以直接测量 GaAs 集成电路的数字或模拟电信号^[1,2]。但由于 Si 是具有中心对称性的晶体, 不能采用这种基于电光效应的直接检测方法。J. A. Valdmanis 等提出在硅集成电路旁放一块电光晶体以测量电信号在此晶体中感生的电场^[3]。还可以采用电压相衬扫描电子显微镜^[4]和扫描光激励探针^[5]的办法, 然而前一种方法灵敏度低, 价钱贵。后一种方法由于引起光电导有一定的干扰作用。其它高阶效应, 例如 Kerr 效应和 Franz-Keldysh 效应由于灵敏度低, 对于硅器件都没有实用价值。

半导体材料的光学性质表明, 由于载流子引起的本征极化作用, 自由载流子对材料的光吸收系数和折射率都将产生干扰^[6], 应用这一概念已做成了光的强度调制器^[7]。H. K. Heinrich 等人根据这一原理提出了适用于 Si 和 GaAs 半导体器件的激光探针无损检测技术^[8], 如果采用的光源波长在红外区, 其对应的光子能量低于被测半导体材料的禁带宽度, 则材料的光吸收可以忽略。自由载流子浓度的变化将主要引起折射率的改变, 再采用激光双光束干涉技术来检测由于折射率变化而产生的光学相位调制信号, 从而可获得

* 国家自然科学基金资助项目

1993 年 2 月 24 日收到初稿, 1993 年 5 月 28 日收到修改稿

器件内部自由载流子分布变化的相关特性。再依据器件工作原理进一步做出物理分析，则可望对于器件工作状态，器件内部结构，器件材料、工艺的选择提供有益的信息。

本文从理论上进一步阐述了折射率受载流子浓度调制的物理基础。分析了用双光束干涉法来检测由于折射率变化引起的光学相位调制信号的原理。实验上采用 $1.3\mu\text{m}$ He-Ne 激光或 InGaAsP/InP 外腔半导体激光作为光探针，实现了 Si 双极型器件内与载流子浓度调制效应相关的电光采样测量。实验结果表明，激光器功率及模式特性对测试灵敏度有较大影响。

2 基本原理

半导体材料内部自由载流子浓度的变化会引起光吸收系数和折射率的改变。简单的电磁理论告诉我们^[1]，自由载流子浓度对半导体光折射率的影响满足下式：

$$n = n_0 \sqrt{1 - \omega_p^2 / \omega^2} \quad (1)$$

其中 n_0 是没有自由载流子扰动时的折射率； ω 是探测光的角频率； ω_p 是载流子的等离子谐振频率，由下式给出：

$$\omega_p^2 = \frac{e^2}{\epsilon_0} \left(\frac{\Delta N_e}{m_e^*} + \frac{\Delta N_h}{m_h^*} \right) \quad (2)$$

其中 e 是电子电荷； ϵ_0 是介电常数； ΔN_e ， ΔN_h 分别是电子和空穴浓度的变化； m_e^* 和 m_h^* 分别是电子和空穴的有效质量。将(2)式代入(1)式可得到自由载流子浓度变化引起的折射率改变 $\Delta n = n(\Delta N_e, \Delta N_h) - n_0$ ，即：

$$\Delta n = - \frac{n_0 e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0} \left(\frac{\Delta N_e}{m_e^*} + \frac{\Delta N_h}{m_h^*} \right) \quad (3)$$

这就是著名的 Drude 公式。其中 $\lambda = 2\pi c / \omega$ 是探测光波长。对于以一种载流子为主的情况，(3)式可写作：

$$\Delta n = n'_p \cdot \Delta N_e \quad (4)$$

$$n'_p = - \frac{n_0 e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 m^*} \quad (5)$$

对于 $1.3\mu\text{m}$ 的探测光， $n'_p \approx 3 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ ，所以当载流子浓度变化 $\Delta N_e = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时，折射率变化约为 3×10^{-5} 。对于如此小的折射率变化，可以用双光束干涉法来检测，它是基于迈克耳逊 (Michelson) 干涉仪的原理。

图 1 给出了双光束干涉法测试装置的原理示意图。 $1.3\mu\text{m}$ 激光器发出的光聚焦后被分束器分成两束光，其中一束光照射到芯片上的有源区，另一束光照射在无源区，两束光在芯片正面被金属化层反射后合束并发生干涉。有源区的折射率随注入载流子浓度的变化而改变，因而测试光束的相位受到调制，无源区的折射率保持恒定，参考光束的相位不被调制。两束光的相位变化经干涉后反映为光强的变化，所以光电探测器接收信号的大小就能反映被测芯片有源区载流子浓度的变化，下面就上述原理进行具体分析。

光束通过被测芯片的有源区时，自由载流子浓度变化引起的相位改变为

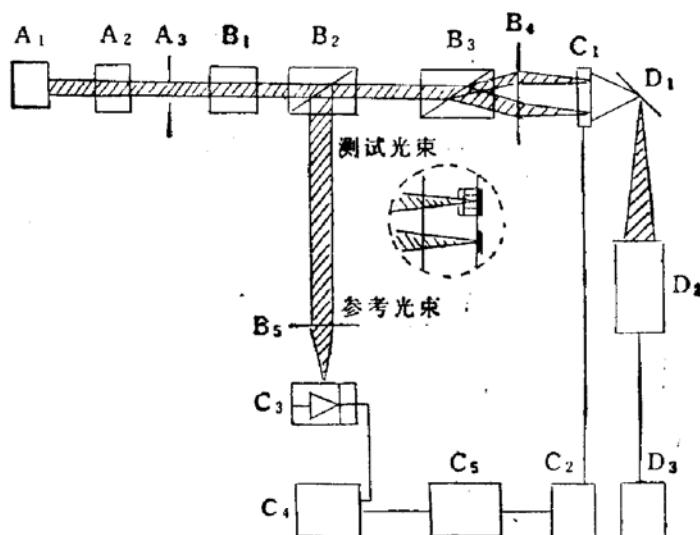


图 1 双光束干涉法测量载流子浓度调制效应的装置原理图

A: 光源部分

A₁: 6328 Å He-Ne 激光器 A₂: 1.3 μm 激光器 A₃: 准直物镜

B: 起偏、分束部分

B₁: 1.3 μm 光隔离器 B₂: 格兰棱镜 B₃: 涅拉斯顿棱镜 B₄: 会聚透镜 1 B₅: 会聚透镜 2

C: 测量部分

C₁: 被测芯片 C₂: 信号源 C₃: 光电二极管 C₄: 放大器 C₅: 双踪示波器

D: 监视部分

D₁: 反射镜 D₂: 摄像机 D₃: 监视器

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot L \\ = -\frac{n_0 c^2 \lambda}{2\pi c^2 \epsilon_0} \left(\frac{\Delta N_e}{m_e^*} + \frac{\Delta N_h}{m_h^*} \right) \cdot L \quad (6)$$

其中 L 是芯片的厚度。如果入射光的电场强度为 $E = E_0 e^{-j\omega t}$, 则光电探测器接收到的光的电场强度为:



图 2 光束通过涅拉斯顿棱镜产生相位差的原理图

其中 ϕ_0 为测试系统光学元件产生的相位差。当其它元件调节得比较好时, ϕ_0 主要由分束器产生, 当采用涅拉斯顿棱镜为分束器时,

$$\phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} (n_e - n_o)(d_1 - d_2) \quad (8)$$

其中 n_e 和 n_o 分别为石英中 e 光和 o 光的折射率, d_1, d_2 是光束在二块棱镜中的路径。如图 2 所示。

这时接收到的总光强为

$$I_T = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} E_T \cdot E_T^* = I_0 \cos^2 \left(\frac{\phi_0 + \Delta\phi}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos(\phi_0 + \Delta\phi)] \quad (9)$$

其中 $I_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} E_0^2$ 为入射光强。将(9)式展开

$$I_T = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos \phi_0 \cos \Delta\phi - \sin \phi_0 \sin \Delta\phi] \quad (10)$$

由于 $\Delta\phi$ 很小, 上式可以改写为

$$I_T = \frac{1}{2} I_0 [(1 + \cos \phi_0) - \Delta\phi \sin \phi_0] \quad (11)$$

对于光电接收器而言, 上式第一项为直流分量

$$i_d = \frac{1}{2} R I_0 (1 + \cos \phi_0) \quad (12)$$

第二项为信号分量

$$i_s = \frac{1}{2} R I_0 \Delta\phi \sin \phi_0 \quad (13)$$

其中 R 是光电探测器的光电转换系数, 主要与探测器的量子效率和光子能量有关。考虑到式(4), (5), (6), 则式(13)可写为

$$i_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_p' \Delta N_e L R I_0 \sin \phi_0 \quad (14)$$

由该式可见, 信号电流的大小与载流子浓度的变化, 入射光强度和探测器的光电转换系数有关。

3 实验装置

图 1 为红外激光双光束干涉法测量半导体器件中载流子浓度调制效应的实验装置示意图。图中 $6328\text{ }\text{\AA}$ He-Ne 激光器为调整光路所用。 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器 ($P_{out} \approx 2\text{ mW}$) 或 InGaAsP/InP 外腔半导体激光器 ($P_{out} \approx 1\text{ mW}$) 用作连续波探测光源。激光束经准直物镜 A, 后通过 B_1 法拉第光隔离器, 其隔离度约 25 dB , 插入损耗约 2.5 dB 。其作用是减少反射回程光对光源的影响以提高输出光的稳定性, 这对于降低噪声, 提高测试灵敏度十分重要。光束接着通过 B_2 格兰棱镜, 它一方面将入射光变为线偏振光同时将其分为偏振方向相互垂直的两束光。其中一束经过 B_3 湿拉斯顿棱镜又将光束分成相互偏离 1.5° 的两束光。物镜 B_4 将两束光聚成相隔一定距离的近似平行的两束光, 分别照射在被测芯片的有源区和参考区(见图 1 中的插图)并被表面的金属层反射又通过衬底而返回。如果将湿拉斯顿棱镜的中心面和被测芯片调节在 B_4 物镜的前焦面和后焦面上, 则此两束光又合为一束光并产生强度调制干涉。偏振分束器 B_5 将由于电荷密度调制引起的干涉信号送到 InGaAs PIN 光电二极管 C_3 和放大器 C_4 (它们组成 PIN + FET 混合集成接收电路, 增益约 40 dB)。器件所加的电信号和电光采样信号用双踪示波器 C_5 显示。

为了给被测器件(集成电路)加上偏置和必要的电信号,设计安装了放置芯片的带微动调节台的测试支架。D₂ 红外摄像仪和 D₃ 显示器用来对准光束与被测管芯的位置。

4 测量结果与讨论

利用以上描述的实验方法和装置,对 Si 二极管和三极管进行了载流子浓度调制效应的测量。二极管给以 2mA 的直流偏置再叠加脉冲测试信号。三极管以共发射极状态工作,基极输入测试脉冲信号,其偏置电路如图 3 所示。测量所得典型的电光采样特性如图 4、图 5 所示。图中下迹线是所加电脉冲信号,上迹线是双光束干涉后对应的光电转换信号。比较两图结果可见,由于三极管有电流放大作用,所以载流子浓度调制效应所对应的采样特性要强得多。对于二极管我们还发现,反向特性硬的采样特性灵敏度高,反向特性软的电光采样特性很弱,或是要加大偏置电流才有明显信号。这些结果从物理上是容易理解的。

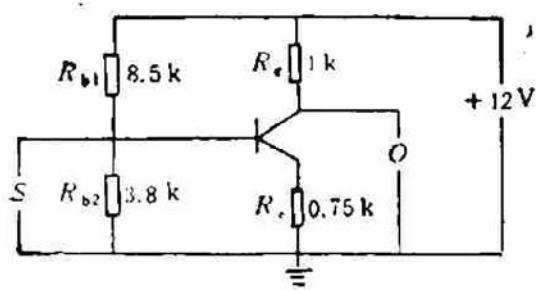


图 3 三极管的偏置电路图

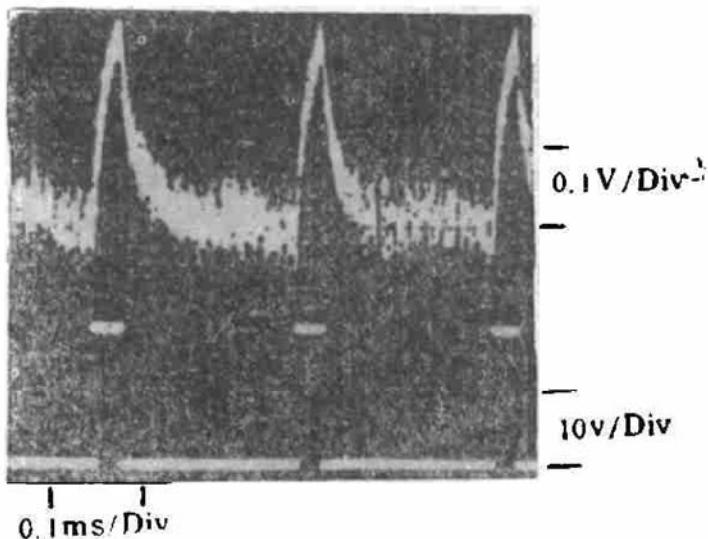


图 4 硅二极管的载流子浓度调制效应

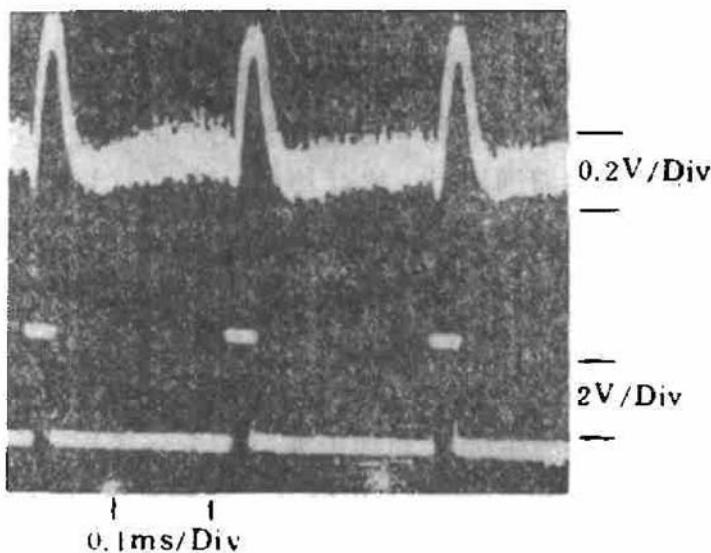


图 5 硅三极管的载流子浓度调制效应

为了试验激光束功率对检测灵敏度的影响, 改变半导体激光器工作电流(I 由 25.8mA 提高到 30.2mA)输出光功率由 1.1mW 增至 2.8mW 。得到的测试结果如图6所示。由图可见, 在相同幅度电脉冲信号下, 采样特性幅度由 40mV 提高到 120mV , 约增加三倍, 而且迹线明显变细, 表明噪声降低。这一结果说明, 提高探测光功率可以显著改善系统的信噪比, 这与前面的理论分析是一致的。

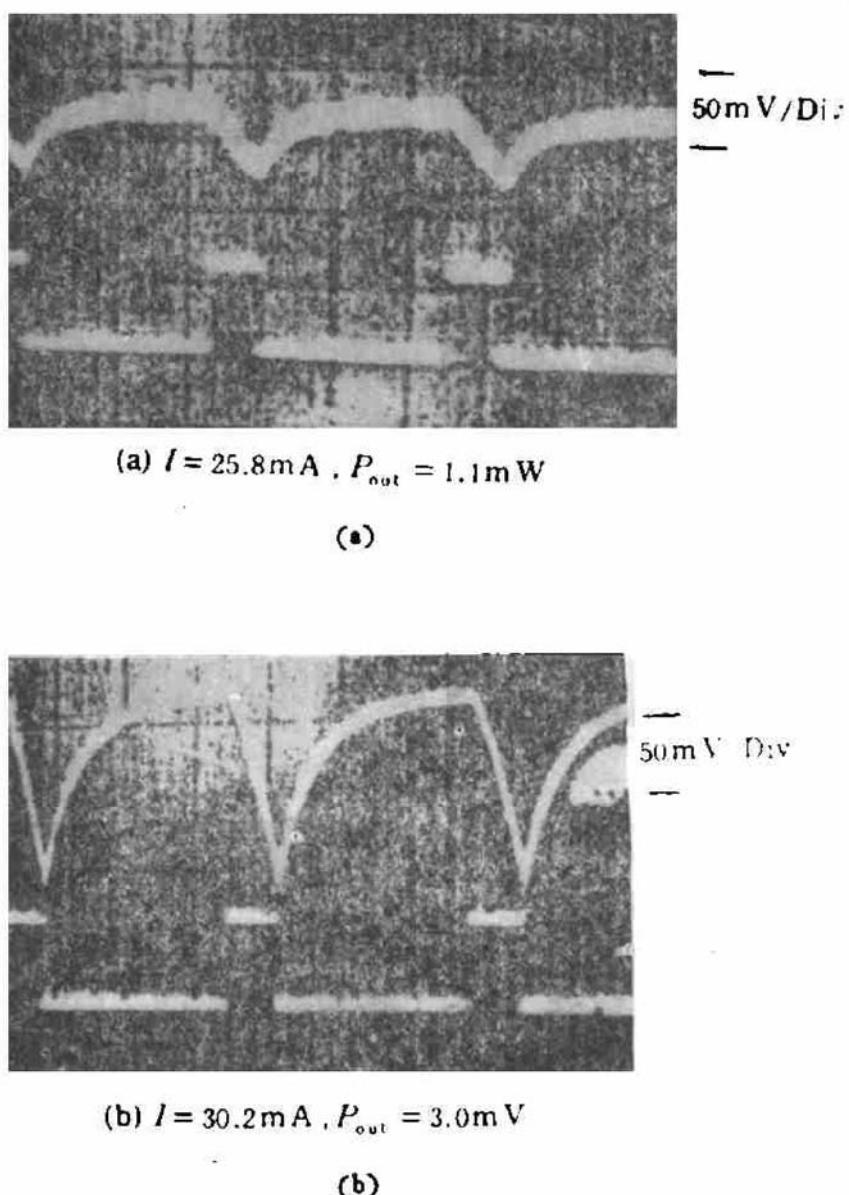


图6 激光探针功率对测试灵敏度的影响

激光光源的模式特性对系统的信噪比会有显著影响。He-Ne激光器虽不是严格单纵模的, 但由于其谱线很窄, 所以与基横模半导体激光器相比性能要好。为了改善半导体激光器的模式特性我们采用外腔选模结构, 同时将反射镜调在不同位置以改变输出光的模式特性。图7左侧为三种不同的输出模式特性, 右侧为对应的电光采样特性。由图可见, 激光光源由多模变为单模时, 电光采样特性幅度提高约二个数量级(90倍)。其主要原因是大大减小了模竞争噪声。由此可见, 采用单纵模激光光源十分有益。

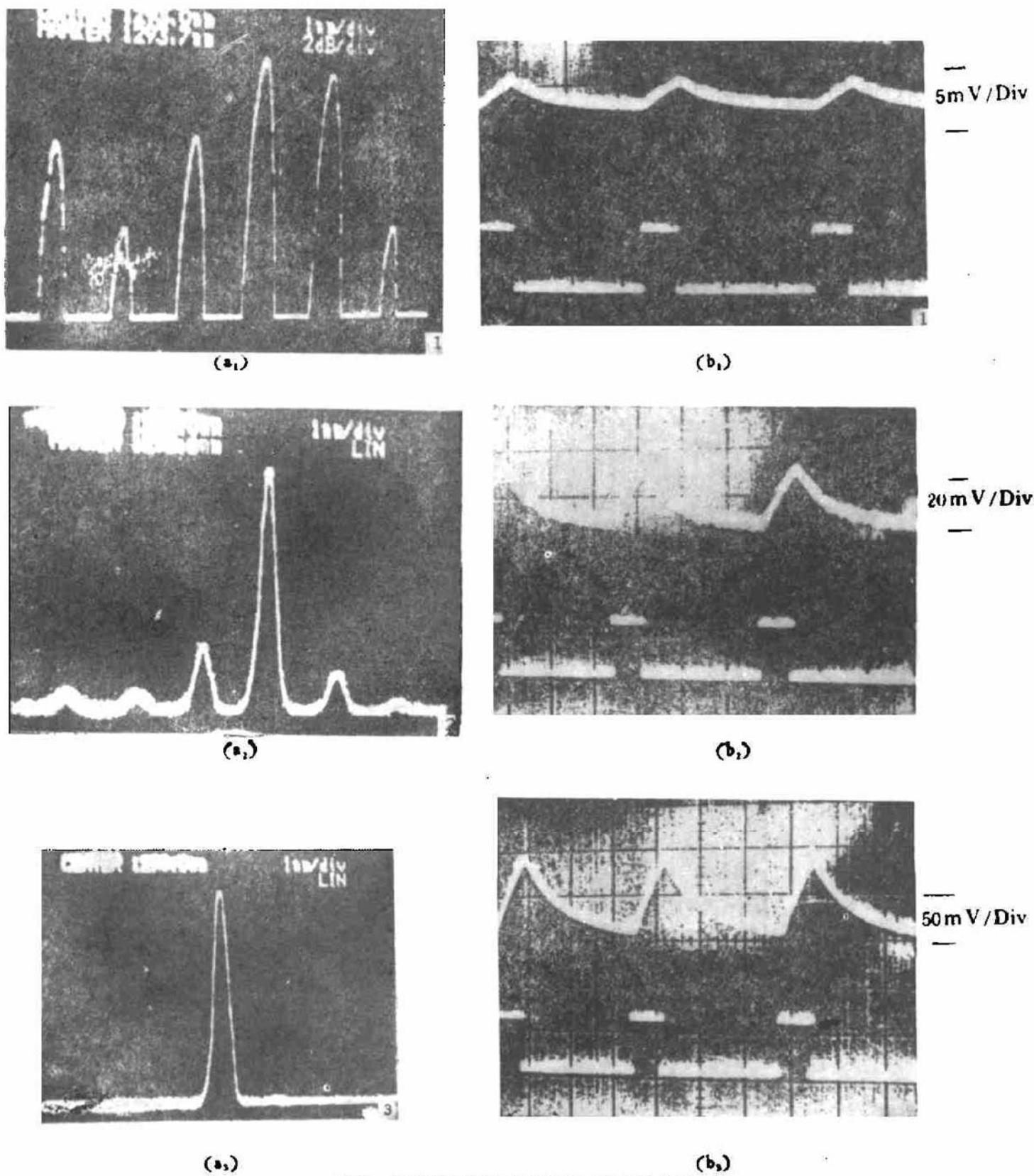


图 7 激光光源的模式对测试灵敏度的影响

5 结语

半导体材料内载流子浓度的变化将引起相应部位折射率的改变。采用红外激光双光束干涉法，通过检测两束光干涉光强的变化可以反映载流子浓度的调制效应。理论分析

和初步实验结果都表明,探测器上调制光强信号的大小与载流子浓度的变化成线性关系。采用单模激光光源、增加激光探针功率,提高光电探测器的量子效率和放大器增益可有效的提高测试系统的信噪比。此方法不仅适用于 Si、GaAs 的分立电子器件,对于 GaAs、InP 系的光电子器件、各类光波导器件以及量子阱、超晶格材料也提供了一种新的测试研究方法。对于集成电路内部各有源器件的特性研究也预示着现实的应用前景。

致谢 本工作中,外腔半导体激光器得到张汉一的支持, PIN + FET 混合集成光电检测放大器由张培亮、刘芹提供。孙成域、何淑芳在工作中给予帮助,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] K. J. Weingarten, M. J. W. Rodwell, H. K. Heinrich, B. H. Kolner and D. M. Bloom, Electron Lett., 1985, **21**:765—766.
- [2] J. Freeman, S. K. Diamond, H. Fong and D. M. Bloom, Appl. Phys. Lett., 1985, **47**:1083—1084.
- [3] J. A. Valdmanis, G. Mourou and C. W. Gabel, Appl. Phys. Lett., 1982, **41**:211—212.
- [4] H. P. Feuerbaum, Scanning, 1983, **5**:14—24.
- [5] F. J. Henley, IEEE Custom Integrated circuits conf., May 1984, 181—186.
- [6] H. Y. Fan and R. J. Collins, Phys. Rev., 1956 **101**:566
- [7] R. B. McQuistan and J. W. Schultz, J. Appl. Phys., 1964, **35**:1243.
- [8] H. K. Heinrich, B. R. Hemenway, K. A. McGroddy and D. M. Bloom, Electronics Lett., 1986, **22**(12):650.
- [9] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, Wiley, New York, 1962.

Detection of Carrier Density Modulation in Semiconductor Devices Using Laser Beam Probe

Jiang Jianping, Li Yanhe, Wu Jianping and Xu Zhizhi

(National Integrated Optoelectronics Laboratory, Region of Tsinghua University, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The real-time nondestructive optical detection of carrier density modulation in semiconductor devices Using a $1.3\mu\text{m}$ He-Ne laser or a InGaAsP/InP semiconductor laser as an optical beam probe is reported. The variation of refractive index induced by free carrier and optical phase modulation are analysed theoretically. It is applicable to electronic and optoelectronic devices fabricated by Si and GaAs materials. It also shows the potential application in measuring parameters of active devices inside integrated circuits.

PACC: 4260, 0760L, 7220