

硅基波导与 GeSi/Si 超晶格探测器之间 光电集成器件的研制*

李 娜 许雪林 李国正 刘恩科

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

蒋最敏 张翔九 王 迅

(复旦大学表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

摘 要 用分子束外延法将 GeSi/Si 超晶格结构生长在 n^+ / n Si 材料上, 先后用反应离子刻蚀法形成探测器波导和硅脊波导, 经适当工艺实现硅波导与 PIN 探测器之间的光电集成, 5 V 偏压下 PIN 探测器的最小暗电流为 $0.8 \mu\text{A}$, 最大光响应电流为 $2.7 \mu\text{A}$, 最大总量子效率为 14%, 工作波长为 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 。

关键词 波导, 光电探测器, 超晶格。

近年来, 硅基光波导如 Si 外延、半导体/绝缘体(SOI)、GeSi 等已得到广泛的研究, 有了比较丰富的理论和实验基础^[1], GeSi 合金、GeSi/Si 异质结、超晶格、量子阱因其具有可调的光电特性也受到越来越多的关注和研究, 并已作出调制、探测等器件, 这些器件将主要应用于光通讯领域。但分立器件的应用是有限的, 光电集成已成为明显趋势, 并成为集成光学的重要研究领域。已有研究者将硅基波导与 GeSi/Si 超晶格探测器集成在一起^[2, 3], 这不仅是集成光学发展的需要, 也是材料的要求。本文报道波导与 GeSi/Si 超晶格 PIN 探测器光电集成器件的研制过程, 其结构如图 1 所示。这时的光波路径为光纤-波导-探测器, GeSi/Si 超晶格层作为探测器的吸收层。

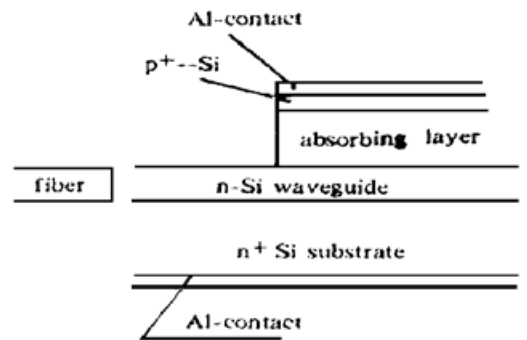


Fig. 1 Schematic view of couple structure of waveguide and photodetector

1 理论设计和制作

波导与探测器的集成首先要求具有低损耗的单模波导, 在此采用 (100)N 型重掺杂硅片 ($\rho < 0.012$) 作为衬底, 外延一层硅 (N_d 约为 10^{16}cm^{-3}) 后刻蚀形成波导, 根据平板波导截止条件和脊形波导模方程^[4], 可确定硅外延单模波导的几何尺寸: 如取硅衬底的折射率为 3.47,

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996-08-13; 收到修改稿日期: 1997-05-12

外延层的折射率为 3.505, 覆盖层的折射率为 1.45, 当外延层厚度 $H = 4 \mu\text{m}$ 时, 外脊高即刻蚀深度 $T = 2.5 \mu\text{m}$, 波导宽度可取 $6 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 。以 GeSi/Si 超晶格作为探测器的光吸收材料, 其结构的确定需考虑多方面的因素: 1) 锗含量 x : 生长在 $\{100\}$ 硅衬底上的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层的禁带宽度由 $E_g(x) = 1.12 - 0.74x$, (eV) 决定。如入射波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 要求 $E_g(x) < hc/\lambda$, 当 $x > 0.4$ 即满足条件, 根据已有的实验报道^[5], 取 $x = 0.6$ 为宜; 2) 单层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层的厚度 d 和超晶格总厚度 T : 在此厚度要满足临界厚度和光传播波特性的要求; 3) 超晶格周期数: 当周期数大于 10 时, 可视 GeSi/Si 超晶格吸收层为平板波导。考虑光吸收和传播等因素, 经优化设计, 在实际结构中取单层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层的厚度 $d = 5 \text{ nm}$, 硅层厚度 = 25 nm , 超晶格总厚度 $T = 600 \text{ nm}$, 周期数为 20。对应这样的薄层, 如果宽度较大 ($> 10 \mu\text{m}$), 则在实际结构中为近似对称平板波导。根据对称平板波导的截止方程, 在此种条件下, 超晶格中只允许基模通过, 高阶模截止, 因此吸收层波导为单模波导。

光电集成的关键问题之一是光学耦合, 根据漏波理论, 波导层中的光波将进入折射率较大的吸收层, 耦合效率取决于各层厚度、折射率分布和吸收区长度。在上述结构中, 用菲涅耳厚度等几何光学法进行分析可知, 要获得较高的量子效率, 如取 GeSi/Si 超晶格的吸收系数为 20 mm^{-1} , 吸收区长度需大于 10 mm , 如吸收系数为 100 mm^{-1} , 则长度至少为 4 mm 。为了便于比较, 在实际器件设计中, 吸收区长度取值范围 $2 \sim 5 \text{ mm}$, 间隔为 1 mm 。

探测器采用 PIN 结构, 应用二极管工作原理, I 层吸收光波, 产生光生载流子, 外加反向偏压, 由于 PN 结的作用, 在外电路形成光响应电流。基本加工工艺包括分子束外延、反应离子刻蚀、电极制作和端面抛光。

2 测试和讨论

测试中采用带光纤的半导体激光器, 输出光强可调, 光纤对准波导端面。光学测试系统和 PIN 探测器的电参数测试线路如图 2 所示。

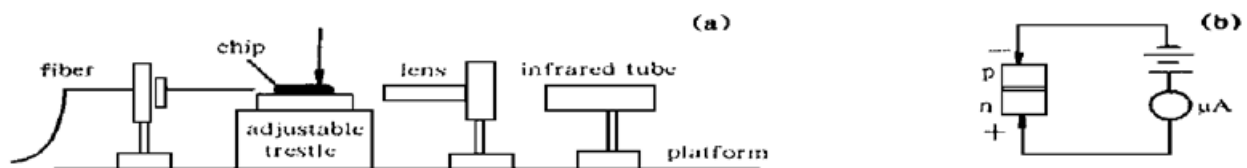


Fig. 2 Schematic of optical and electronic test system

(a) Optical test system, (b) Electronic test system

线路接好后, PIN 加反向偏压, 无光波入射时, 微安电流表(量程 $20 \mu\text{A}$) 的指示读数是 PIN 探测器的暗电流, 暗电流与反偏压以及与 PN 结面积的关系如图 3(a) 所示, 其大小随反偏压和面积的增加而变大。反偏压为 -5 V 时, 最小暗电流密度为 $7.7 \times 10^{-4} \text{ A/cm}$, 这样的数量级与国外同类研制器件相当。随着入射光强的增加, 微安表的指数增大, 这就是所需要的光响应电流。此电流与反偏压以及探测区面积或者长度同样存在某种关系, 如图 3(b) 所示。测试结果表明光响应电流和暗电流均与反偏压以及探测区面积成正比。这种关系反映两项性能参数的矛盾所在, 即在与面积的关系上二者不可兼得, 从而增加了设计的难度。对于 $1.3 \mu\text{m}$ 的光波, 当入射光强为 $17 \mu\text{W}$ 时, 在 -5 V 的反向偏压下, 最大光响应电流为 $2.5 \mu\text{A}$, 最大内量子效率为 42% , 最大总效率为 14.2% 。



Fig. 3 Test result of dark current and photocurrent of photodetector. The length of absorbed area: A: 4 mm, B: 3 mm, C: 1 mm, width: $20 \mu\text{m}$. (a) Relation of dark current with reverse bias and area, (b) Relation of photocurrent with reverse bias and area

此项研究中的半导体工艺加工在重庆固体电路研究所二部进行, 非常感谢张正元工程师, 刘建华高级工程师, 胡刚毅先生给予的大力协助, 并感谢所有关心和帮助此项工作的人士。

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, J. Schmidthen, K. Petermann, Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(8) : 1971~ 1974
- [2] A. Splett, T. Zinke, K. Petermann *et al.*, Intergration of waveguides and photodeteors in SiGe for 1.3 μm operation. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1994, **6**(1) : 59~ 61
- [3] V. P. Kesan, P. G. May, F. K. Legoues *et al.*, GeSi/Si heterostructure grown on SOI substrates by MBE for integrated optoelectronics. *J. Crystal Growth*, 1991, **111**(4) : 936~ 942
- [4] 刘育梁, 刘恩科, 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子色散效应. *光学学报*, 1991, **11**(8) : 727~ 731
- [5] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, GeSi-x strained-layer superlattice waveguide photodetectors operating near 1.3 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(1) : 963~ 965

Fabrication of Intergrated GeSi/Si Superlatic PIN Photodetector with Waveguide

Li Na Xu Xuelin Li Guozheng Liu Enke

(Department of Electronics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Jiang Zumin Zhang Xiangjiu Wang Xun

(Surface Physics Key National Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433)

(Received 13 August 1996; revised 12 May 1997)

Abstract The GeSi/Si superlattices structure is grown on the n^+/n^- Si wafer by MBE method. The detector and the Si rib waveguides are formed by reactive ion etching. The integration of Si waveguide and GeSi/Si superlattices PIN photodetector is fabricated through the suitable process. The minimum dark current of PIN detector is $0.8 \mu\text{A}$ and the maximum photocurrent is $2.7 \mu\text{A}$ at 5 V reverse bias. The maximum overall quantum efficiency of photodetector of 14.2% was obtained. The working wavelenth $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$.

Key words waveguide, photodetector, superlatic.