

Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格 PIN 探测器的研制*

万建军 李国正 李 娜 许雪林 刘恩科

(西安交通大学微电子工程系 西安 710049)

摘要 本文对 Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格 PIN 探测器进行了分析和设计(其中 $x = 0.6$), 并制作出了相应的器件. 对典型器件的测试结果表明, 在 $1.3\mu\text{m}$ 光照下, 反偏电压为 -5V 时, 光响应电流为 $2.6\mu\text{A}$, 暗电流为 400nA , 探测灵敏度为 $0.153\mu\text{A}/\mu\text{W}$. 最大总量子效率为 14.2% .

PACC: 4282, 0670, 6155, 6865

1 引言

光纤通信主要有两个引人注意的波段, 即 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段和 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段. 在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段, 硅(Si)雪崩光电探测器(APD)具有增益高、噪声低、响应快和价格低等优点, 目前尚无其它光电探测器能与之匹敌. 在 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段, 以前大都采用锗(Ge)雪崩光电探测器, 但由于锗中空穴和电子的离子化系数之比很小, 其过量噪声因子很大^[1], 因而这类探测器工作时的过剩噪声很大. 如果一种探测器同时具有两者的优点, 既能探测 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 的光, 又没有太大的过剩噪声, 将是人们求之不得的. 由此人们自然会想到利用两者的合金材料. 随着分子束外延(MBE)技术的出现, 已经生长出了应变 Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结和超晶格材料^[2], 研究表明, 随着 Ge 含量的不同, 可使 Ge_xSi_{1-x} 合金的吸收长波限在 $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ 范围内变化, 并且它具有良好的电学性能^[3], 因此它可以用来制造 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段的探测器. 1986 年, Luryi^[4], Temkin^[5,6] 和 Pearsall^[7] 等人报道了用 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格材料做吸收层, 在硅片上制备了可在 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长范围内工作的 PIN 型及雪崩倍增型光电探测器. 本文将介绍我们研制的 GeSi/Si 应变超晶格 PIN 探测器, 该探测器和 Si 外延型单模脊形波导集成在一起.

2 结构及工作原理

我们研制的探测器的结构如图 1(b) 所示, 这里把探测器和 Si 外延型单模脊形波导集成

* 本课题受国家自然科学基金资助
万建军 硕士生, 目前在刘恩科教授指导下, 从事全硅集成光学器件的研究
1997-06-11 收到, 1998-01-09 定稿

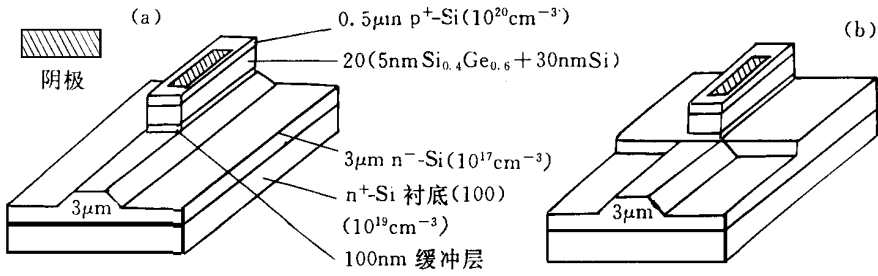


图 1 GeSi/Si 应变超晶格 PN 探测器的两种结构

在一起是为了提高器件的外量子效率^[3]。图 2 是该探测器的能带图

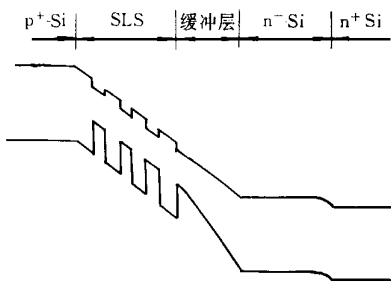


图 2 探测器的能带图

从光纤耦合入波导的光到达探测器时, 由于超晶格材料的折射率比波导(外延 Si 层)的大, 光将从波导散射出来, 进入超晶格中被吸收, 产生光生电子和空穴对, 在反向偏压的作用下, 电子和空穴分别向两极漂移, 从而产生光生电流

3 波导及探测器的设计

3.1 波导的设计

这里所用的波导是硅外延单模脊形波导, 由于半导体的折射率随载流子浓度升高而降低, 若在重掺杂的 Si 衬底上外延轻掺杂的 Si, 就可以制作出外延平面波导。在平面波导的基础上, 利用大截面理论^[8,9], 就可以设计出能与单模光纤有效耦合的单模脊形波导。我们采用的尺寸为: 波导厚度为 3 μm, 腐蚀深度为 1.2 μm, 波导顶宽度为 8 μm 或 10 μm。

3.2 探测器设计

探测器的设计主要包括应变超晶格(SLS)材料的组份比、超晶格的总厚度及周期数和探测器的长度等

Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格层是光的吸收层, 为使波长 1.3~ 1.6 μm 的光能被有效吸收, Ge_xSi_{1-x} 的禁带宽度 E_g(x) 应满足

$$E_g(x) < 1.24/\lambda \text{ (eV)}$$

$$(\text{= } 0.95\text{eV, 当 } \lambda = 1.3\mu\text{m 时}) \quad (1)$$

由 E_g(x) = 1.12 - 0.74x^[10] 可算得 x > 0.23。Temkin 等人测量发现^[5], 随着 Ge 含量的不同, 探测器的内量子效率随入射波长的变化关系亦不同, 如图 3 所示, 可见, 当 x = 0.6 时, 材料对该波段的光的吸收系数最大, 故取 x = 0.6 为最佳

Ge_xSi_{1-x} 与 Si 的晶格常数不同, Si 上外延生长的 Ge_xSi_{1-x} 应变层的厚度增大到一定值时, 应变能通过产生失配位错释放出来, Si 上生长 Ge_xSi_{1-x}

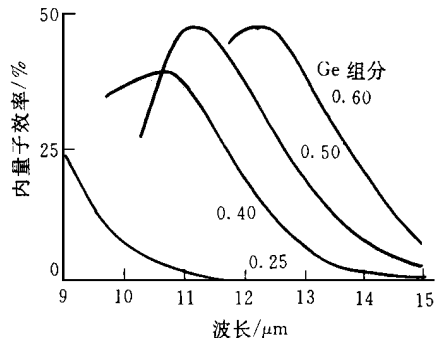


图 3 不同锗含量下内量子效率随入射光波长的关系

有一个临界厚度 h_c 据文献[11], h_c 可表示为

$$x^2 h_c = 1.33 \ln(h_c / 0.4) \quad (2)$$

上式中 x 为锗的含量, h_c 以 nm 为单位

对于 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格, 若组分用等效组分 $x_{\text{SL.S}}$ 表示

$$x_{\text{SL.S}} = [t_{\text{GeSi}} / (t_{\text{GeSi}} + t_{\text{Si}})] x = rx \quad (3)$$

其中 r 为占空比(Duty Cycle); t_{GeSi} 和 t_{Si} 分别为超晶格中 GeSi 子层和 Si 子层的厚度, 则整个超晶格的总临界厚度 H_c 也可用(2)表示

$$(rx)^2 H_c = 1.33 \ln(H_c / 0.4) \quad (4)$$

文献[11]对 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格多量子阱的光吸收特性进行了详细的理论分析. 分析表明, 对波长 $1.3\mu\text{m}$ 的光, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格多量子阱波导在占空比为 0.15~0.20 时可获得最大的光吸收. 取 $r=0.2$, 代入(4)式得 $H_c=0.69\mu\text{m}$.

由(2)式可得, 当 $x=0.6$ 时, $h_c=12.8\text{nm}$, 取 $t_{\text{GeSi}}=5\text{nm}$, $t_{\text{Si}}=25\text{nm}$, 则 $r=0.17$, $H_c=1.04\mu\text{m}$, 则多量子阱的最大周期数为 34.

我们实际制作的器件的 Ge 含量 $x=0.6$, 应变超晶格层总厚度为 $0.6\mu\text{m}$, 其中 GeSi 阱层厚度为 5nm , Si 势垒层厚度为 25nm , 周期数为 20.

理论上已知探测器的内量子效率 η_{in} 和长度 L_d 的关系为

$$\eta_{\text{in}} = 1 - \exp(-\alpha_{\text{SL.S}} L_d) \quad (5)$$

其中 $\alpha_{\text{SL.S}}$ 为超晶格材料的有效吸收系数, 若 $\alpha_{\text{SL.S}}=20/\text{cm}^{[12]}$, 则由(4)式可知, 当 $L_d > 1\text{mm}$ 时, 将至少有 86% 的光被吸收. 可见为了保证光被探测器充分吸收, 探测区长度至少要达到 1mm . 表 1 列出了部分探测器的尺寸.

表 1 部分波导和探测器的尺寸

No.	波导		探测器吸收区		
	长度/mm	宽度/ μm	长度/mm	宽度/ μm	面积/ mm^2
1	1	8	5	20	0.1
2	2	8	4	20	0.08
3	3	8	3	16	0.048
4	4	10	3	22	0.066
5	5	10	1	22	0.022
6	1	10	5	10	0.05
7	2	10	4	10	0.04
8	3	10	3	10	0.03
9	4	10	2	10	0.02
10	5	10	1	10	0.01
11	2	8	4	16	0.024
12	2	10	4	22	0.088
13	3	8	3	16	0.048
14	3	10	3	22	0.066
15	3	10	4	22	0.088

4 器件测试与分析

采用具有五维调节架的测试平台进行测试, 光从单模光纤端面耦合入波导. 图 4 和图 5

是一些探测器在不同反偏压下的暗电流和光响应电流曲线 所有的测试均在室温下进行

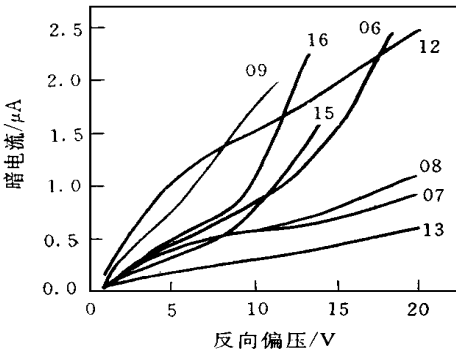


图 4 探测器的暗电流随反偏压的关系

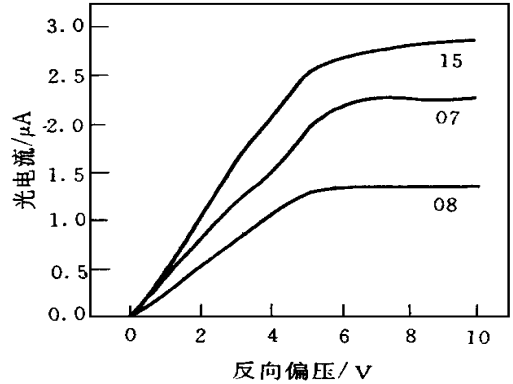


图 5 光响应电流随反偏压的关系

$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$.

测试发现, 器件No. 15 在- 5V 偏压下的暗电流较小(400nA), 而光响应电流较大(2.6μA), 我们用它作为典型器件, 对它的特性进行测试和分析

量子效率是探测器首先应考虑的一个指标 它包括内量子效率和外量子效率两部分, 外量子效率就是光纤到波导的耦合效率, 主要应考虑波导端面的反射损耗 内量子效率如式(5)所示, 则探测器的总量子效率可以写为

$$\eta = (1 - R) [1 - \exp(-\alpha_{\text{Si}} L_d)] \tag{6}$$

其中 R 为波导端面的反射系数

前面已经提到, 采用这种波导型探测器可以提高量子效率, 这是因为光从波导进入探测器区域后, 光逐渐从下面的 Si 波导层散射到上面的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格中被吸收, 只要探测器足够长, 就可以保证光被充分吸收, 从而其内量子效率可以达到很高, 虽然从光纤入射到波导端面的光有很大一部分被反射使得外量子效率降低, 但可以通过增加一层增透膜来减少光的反射损耗, 从而提高外量子效率进而提高总量子效率

为便于计算量子效率, 通常用到以下公式

$$\eta = \frac{I/q}{P_0/(h\nu)} \tag{7}$$

其中 P_0 为从光纤输出功率; I 为某一偏压下的光响应电流与暗电流之差 这个公式是由量子效率的定义直接得到的 将 $P_0 = 17\mu\text{W}$, 器件No. 15 在- 5V 偏压下的光电流与暗电流之值(2.6μA 和 0.4μA) 代入上式, 可算得 $\eta = 14.2\%$. 文献[13]报道了同类器件的最大总量子效率为 11%, 目前尚无比我们的结果更好的报道

改变激光器偏置状态, 使其输出功率逐渐减小 我们发现, 当激光输出功率减小到 3.8μW 以下时, 读取光响应电流的微安表的读数不再减小, 因此该探测器的最小可探测光功率为 3.8μW, 和毫瓦相比的分贝数为- 4.2dB. 探测器在- 5V 偏压下的电流响应度(即灵敏度)为 $0.153\mu\text{A}/\mu\text{W} (= 2.6\mu\text{A}/17\mu\text{W})$. 显然探测器的这两个指标还有待进一步提高

输入频率为 ω 的调制光时, 负载 R_L 上的输出电压为

$$V_o = \frac{I_p R_L}{1 + j\omega R_L C_j} \tag{8}$$

式中 I_P 为光响应电流 相应的电压有效值为

$$V_{\text{om}} = \frac{I_P R_L}{(1 + \omega^2 \tau_c^2)^{1/2}} \quad (9)$$

式中 $\tau_c = R_L C_j$ 是电路时间常数, 可见输出电压随频率升高而降低, 当 $\omega \tau_c = 1$ 时, 电压幅度下降为最大值的 0.707 倍, 此时对应的频率为高频截止频率, 相应 f_c 可写作

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_L C_j} \quad (10)$$

通过对 PN 结构的内部电场进行分析, 且取 $R_L = 50\Omega$, 可以估算出探测器的高频截止频率约为 10.5GHz 实际测得光脉冲的响应时间 $t_r = 80\text{ps}$, 对应的高频截止频率为 12.5GHz

由于条件所限, 没有对器件的光谱响应特性进行测试

从测试结果看, 一些器件的暗电流较大, 分析发现表面产生电流对总暗电流的贡献较大, 是主要的漏电因素 产生表面漏电的原因部分是由于低温钝化膜的质量不高, 与 GeSi 表面接触时形成较多的复合中心 另一重要原因是表面沾污, 为了减小因表面污染造成的表面漏电的影响, 可对器件作些常规减漏处理, 如在器件表面涂上一层硅橡胶 实验表明, 该方法的效果十分明显

另外, 改善电极制作, 降低欧姆接触电阻也是十分重要的, 例如用 TiAu 合金代替 Al 作电极等

5 结语

本文对 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格 PN 探测器进行了设计, 并利用 MBE 法生长出了 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格材料, 结合硅平面工艺, 制作出了探测器 测试发现, 探测器的量子效率已达到了较高水平, 但光电流响应度较小, 且探测灵敏度不高 如果在这种 PN 探测器后面紧接一个分立的或与 PN 探测器集成的场效应晶体管(FET), 对所接收的微电信号进行放大, 将有助于提高探测器的这两个参数 另外, 我们也可以直接在探测器内部获得增益, 即采用所谓雪崩倍增结构, 也可获得同样甚至更好的效果^[3], 这种结构的获得只须在图 1 所示探测器结构的 Si 层与 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格之间加入一层本征 Si, 工艺难度没有增加很多, 但器件的性能可望得到较大的改善 目前这种器件我们正在研制中

参 考 文 献

- [1] 杜宝勋等译, 半导体光检测器, 北京: 电子工业出版社, 1990, 83~112
- [2] J. C. Bean, L. C. Feldman, A. T. Fiory *et al.*, *J. Vac. Sci. Tech. A*, 1984, **2**(2): 436~440
- [3] R. People, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **22**(9): 1696~1710
- [4] S. Luryi, T. P. Pearsall, H. Temkin, *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, **7**(2): 104~107
- [5] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(15): 963~965
- [6] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(13): 809~810
- [7] T. P. Pearsall, H. Temkin, J. C. Bean *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, **7**(5): 330~332

- [8] R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petemann, IEEE J. Quant Electron, 1991, 27(8): 1971~ 1974
- [9] 刘育梁, 刘恩科, 光子学报, 1991, 11(8): 727~ 731
- [10] S. C. Jain, Germanium-Silicon Strained Layers and Heterostructures, New York: Academic Press, 1994, chapter 1.
- [11] R. People, J. C. Bean, Appl Phys Lett, 1986, 47(2): 322~ 327.
- [12] 刘育梁, 王启明, 杨沁清, 光学学报, 1995, 24(1): 33~ 38
- [13] A. Splett, T. Zinke, K. Petemann *et al*, IEEE Photonics Technol Lett, 1994, 6(1): 59~ 61.

Design and Fabrication of GeSi_x/Si Strained Layer Superlattice Waveguide PIN Photodetectors at $\lambda= 1.3\mu\text{m}$

W an Jianjun, L i Guozheng, L i N a, Xu Xuelin, L iu Enke

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

Received 11 June 1997, revised manuscript received 9 January 1998

Abstract We have designed and fabricated Ge_xSi_{1-x}/Si strained layer superlattice (SLS) photodetectors integrated with Si epitaxial waveguides. It is exhibited that at 5V reverse bias the maximum photocurrent is 2.6 μA , the minimum dark current and the minimum dark current density are 400nA and 10⁻³A/cm², respectively. It is also measured that the overall quantum efficiency is 14.2%.

PACC: 4282, 0670, 6155, 6865