

新型电光强度调制器的研究*

李国正 刘恩科

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘要 在全硅和 GeSi 电光强度调制器研究的基础上, 提出了一种新型的电光强度调制器结构, 目的在于减小调制电流和提高调制频率。

关键词 硅, 锗硅, 电光调制。

1 引言

近年来, 随着人们对硅材料的进一步研究和认识, 全硅光电子器件及其集成技术已成为光电集成电路的一个重要研究方向。硅器件制作工艺成熟, 加上硅具有等离子体色散效应, 这就为硅电光调制技术及其相关器件的研究开辟了一条道路。Ge_xSi_{1-x} 是一种新型的半导体材料, 调节 Ge 的含量 x, 就能改变其能带结构, 使其具有许多独特的性质。p-n Ge_xSi_{1-x}-Si 异质结电子的注入效率高, 若 Ge_xSi_{1-x} 合金材料也有像硅材料那样的等离子体色散效应, 则制作电光强度调制器又增加了一条新的途径。电光强度调制器在光通信、光测控等领域中有着广泛的应用。

2 电光强度调制器的工作原理及制作

全硅电光调制器采用脊形波导状, 其外形结构如图1所示, 调制信号加在 p⁺ 和 n⁺ 两电极之间。当强度一定的光 ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) 垂直入射到波导形调制器的端面上时, 若无电学调制信号, 则出射光强恒定不变。若有电学调制信号, 则出射光强度随调制信号作相应的变化。

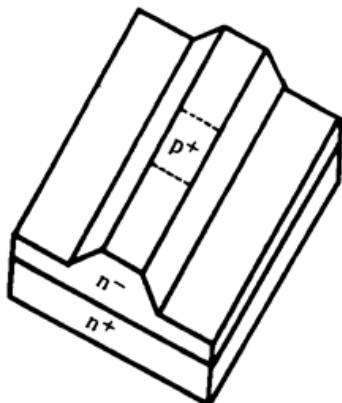


Fig. 1 Silicon electrooptics modulator

硅电光调制器的调制作用是基于等离子体色散效应。即当 p⁺n⁻ 结加上正向电压时, 就有大量的空穴(稳态时空穴浓度增量用 ΔN_A 表示)从 p⁺ 区注入到 n⁻ 区, 为了保持电中性, n⁻ 区就会积累等量的电子 ΔN_e 。大注入时, ΔN_e 超过 n⁻ 区原来的电子浓度。n⁻ 波导区增加的 ΔN_A 和 ΔN_e 将引起折射率 n 和吸收系数 α 的变化, 根据文献[1], Δn 和 $\Delta \alpha$ 可表示为

* 国家科委 863 高科技项目和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1994 年 12 月 3 日; 收到修改稿日期: 1995 年 7 月 9 日

$$\Delta n = -\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 \epsilon_0 c^2 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{e\dot{c}}} + \frac{\Delta N_h}{m_{h\dot{c}}} \right) \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \frac{e^3 \lambda^2}{4\pi^2 \epsilon_0 c^3 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{e\dot{c}}^2 \mu_e} + \frac{\Delta N_h}{m_{h\dot{c}}^2 \mu_h} \right) \quad (2)$$

其中, $m_{e\dot{c}}$ 和 $m_{h\dot{c}}$ 分别是电子和空穴的电导有效质量, e 为电子电荷, λ 为光波波长, n 为纯 Si 的折射率。可见, 自由载流子在 n^- 波导区的大量增加, 不仅对光的吸收作用变强, 还引起折射率下降, 波导中的光就会部分或全部泄漏到 n^+ 衬底中去, 脊形波导中传输的导模强度受到调制。

作者曾对硅电光调制器作过研制^[2], 调制深度达 90% 以上时的调制电流约 2 A (电流密度为 1.7×10^4 A/cm²)。然而, 这样的调制电流太大了。光的强度调制与相位调制不同, 对 p^+ 调制区的长度没有严格的要求, 只要注入到波导层(n^- 区)的 ΔN_h 足够大, 使 Δn 和 $\Delta \alpha$ 的变化足够大, 就能实现光强度的调制。因此, 把 p^+ 注入调制区的面积减小到 $4 \times 172 \mu\text{m}^2$, 测试结果表明, 在同样调制深度的情况下, 调制电流降到 100 mA 左右。为了使电光调制器能够实用化, 调制电流还须减小一个数量级。为达此目的, 作者曾提出继续减小 p^+ 调制区的设想, 同时为防止该区太小引起注入载流子的过份散开, 又加了一些紧固措施。这种方案无疑是可以实现的, 但制作工艺较复杂。而异型异质结电光调制器已展现出美好的应用前景。

3 异型异质结电光强度调制器

上述的电光强度调制器是利用 Si 的 p-n 结注入载流子来实现的, 它属异型同质结电光强度调制器, p-n 同质结两边是一种半导体材料, 禁带宽度是相同的。正向注入时, p 区向 n 区注入空穴, n 区也向 p 区注入电子。因此, 异型同质结电光调制器的调制电流是空穴电流与电子电流之和。显然在图 1 所示的电光调制器中, 从 n^- 波导区向 p^+ 顶区注入的电子电流对光的调制是不起作用的, 它却增大了调制电流。

异型异质结电光强度调制器如图 2 所示, 可降低调制电流。它是在 $30 \sim 40 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 p 型 $\langle 100 \rangle$ 硅衬底上, 利用分子束外延, 先生长一层 $3 \mu\text{m}$ 厚的 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 合金层, 再在其上生长一层 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的 $n^+ \text{Si}$ 层, 后经脊形波导的腐蚀、电极制备及端面抛光等, 便可制成。

由于 p 衬 Si 和上面 $n^+ \text{Si}$ 均存在自由载流子, 从(1)式可知, 它们的折射率均小于本征 Si 的折射率。而 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层的折射率 n_{GeSi} 为

$$n_{\text{GeSi}} = n_{\text{Si}} + 0.18x \quad (3)$$

其中 n_{Si} 为本征 Si 的折射率, x 为 GeSi 合金中 Ge 的含量。显然, $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 波导层的折射率比其上、下包层的都大, 因此, 在无调制信号作用时, 光波被限制在 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 波导层中传播。

Si 的禁带宽度为 1.12 eV, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金的禁带宽度为 $(1.12 \text{ eV} - 0.74x \text{ eV})$ 。当 $x = 0.1$ 时, $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 的禁带宽度就为 1.046 eV。可见, Si 与 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 的禁带宽度不相等。因此, 图 2 中的 $n^+ \text{Si}$ 与 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 接触形成 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9} \text{-Si}$ 异型异质结时, 其能带结构的示意图如图 3 所示。其中(a)、(b)分别表示未加偏置和加正向偏置时 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9} \text{-Si}$ 异型异质结的

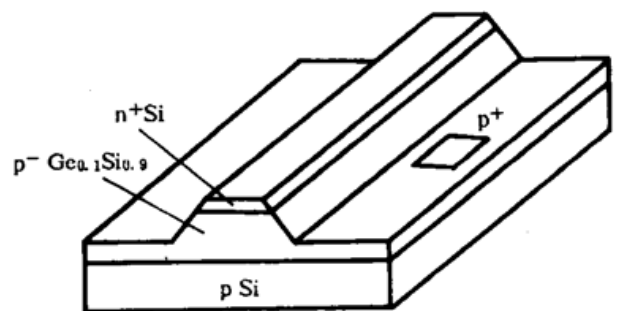


Fig. 2 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9} \text{-Si}$ heterojunction electrooptics modulator

能带结构。电光强度调制器有调制信号时, 就与 $p^-n^+ \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}\text{-Si}$ 异质结加正向偏置相对应。从图 3(b) 可见, 当该异型异质结加上正向调制信号时, 电子势垒降低, 从 $n^+ \text{Si}$ 区向 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 波导区大量注入电子, 由于等离子色散效应, 使出射光的强度受到调制。与此同时, 正向调制信号也使空穴势垒降低, 但因空穴势垒原来就很高, 现在的降低相对不大, 所以从 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 区向 $n^+ \text{Si}$ 区注入的空穴很少。这就是异质结注入效率比同质结高的原因, 这也是异型异质结电光强度调制器比异型同质结电光强度调制器调制电流小的原因。



Fig. 3 The sketch diagram of energy band of $p^-n^+ \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}\text{-Si}$ heterojunction

(a) Bias voltage $V = 0$, (b) Bias voltage $V > 0$

对于图 2 所示的电光调制器, 测试发现调制深度达 90% 以上时的调制电流为 180 mA, 比全硅 $p\text{-}n$ 结电光调制器的调制电流 (100 mA) 还大, 这是由于图 2 结构的 $n^+ \text{Si}$ 面积过大 ($12 \times 5000 \mu\text{m}^2$) 复盖着全部波导造成的。对光强度起调制作用的因素是 $n^+ \text{Si}$ 区注入到 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 区的电子浓度的增量 ΔN_e 和与之保持电中性的 ΔN_h , 因此, 若将图 2 中 $n^+ \text{Si}$ 的面积减小到 $12 \times 100 \mu\text{m}^2$ (很容易实现), 在不降低 ΔN_e 和 ΔN_h 的前提下, 调制电流降低到 10 mA 左右应该是不成问题的。这项工作正在进行中。

4 提高调制频率的探索

电光强度调制器调制频率的高低, 取决于波导区 ΔN_h 和 ΔN_e 建立和消失过程的快慢。采用电子辐照的办法, 可加快 Δn_h 和 ΔN_h 的消失过程, 对于图 1 所示的全 Si 电光调制器, 调制频率还达不到 1 MHz, 主要原因是 ΔN_h 和 ΔN_e 的稳态建立过程太慢。这是由于 n^- 波导层是在普通高温外延炉中生长的, n^+ 衬底中的杂质在外延过程中会反扩到 n^- 层, 使其中形成上稀下浓的杂质分布, 进而产生妨碍注入空穴向下运动的电场, 使 n^- 波导层中 ΔN_h 和 ΔN_e 到达稳态的过程变慢。对于图 2 所示的异型异质结电光调制器, 调制频率不高是由于 $p^-n^+ \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}\text{-Si}$ 异质结的面积过大 (结电容过大) 造成的, 这个问题是容易解决的。

无论何种结构的电光强度调制器, 波导层总有几个微米的厚度, 若不采取有效措施, ΔN_h 和 ΔN_e 的稳态建立过程不可能快, 调制频率就不会高。为了解决此问题, 可以设想波导层作成上浓下稀的杂质分布, 浓度梯度为 $dN(x)/dx$, 则由于掺杂不均匀就会在波导层产生加速注入载流子向下运动的漂移电场 E , 它可表示为

$$E(x) = \frac{kT}{q} \frac{1}{N(x) + \Delta N(x)} \frac{dN(x)}{dx} \quad (3)$$

其中, $N(x)$ 为波导层杂质分布, $\Delta N(x)$ 是注入波导区的载流子分布。在注入刚开始时, $\Delta N(x) = 0$, $E(x)$ 有最大值 $E_{\text{max}}(x)$ 为

$$E_{\max}(x) = \frac{kT}{q} \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx} \quad (4)$$

显然，在波导层人为引进加速注入载流子向下运动的漂移电场，定会加快稳态 ΔN_s 和 ΔN_r 的建立过程，从而提高电光强度调制器的调制频率。

5 新型电光强度调制器

在图 2 所示电光强度调制器的基础上，将上 n^+ Si 层的面积缩小到 $12 \times 100 \mu\text{m}^2$ ，再将 $p^- \text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 波导层作成上浓下稀的杂质分布，即可得到新型电光强度调制器，其中心横截面结构如图 4 所示。这种电光调制器预计有以下特点：

- 1) 采用分子束外延，生长温度低，各层间不易发生杂质互扩散；
- 2) 异型异质结注入效率高，可有效减小电光调制器的工作电流；
- 3) 在波导层人为引进加速注入载流子的漂移电场，可以提高调制工作频率。

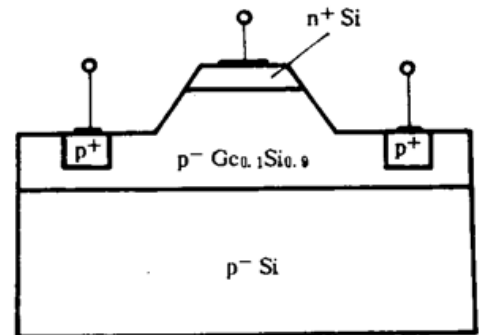


Fig. 4 The sketch diagram of transverse cross-section structure of new type electro-optic modulator

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, B. R. Bennett, *Electrooptical effects in silicon*. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, QE-23(1): 123~129
- [2] 刘育梁, 刘恩科, 李国正等, 1.3~1.6 μm 硅电光强度调制特性研究. 1991 光电子器件与集成技术年会论文集. 北京, 清华大学出版社, 1991: 485~488

A New Type of Electro-Optic Modulator

Li Guozheng Liu Enke

(Department of Electronic Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

(Received 3 December 1994; revised 9 July 1995)

Abstract On the basis of the experiments for silicon and GeSi electro-optic modulator, a new type of electro-optic modulator is proposed, in order to decrease the modulating current and increase the modulating frequency.

Key words Si, GeSi, electro-optic modulate.