

Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格雪崩光电探测器的 分析与优化设计

李国正 张 浩

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘 要 对 Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格雪崩光电探测器进行了分析与优化设计。优化结构为:i-Si 雪崩区厚是 1.8~2 μm;p-Si 区的掺杂浓度是 10¹⁸ cm⁻³,厚为 17 nm;超晶格总厚为 340 nm。它可探测 1.3~1.6 μm 的红外光。

关键词 GeSi, 应变超晶格, 雪崩光电探测器。

1 前 言

光纤通信系统有两个引人注意的波段,即 0.8~0.9 μm 波段和 1.3~1.6 μm 波段。在 0.8~0.9 μm 波段,硅(Si)雪崩光电探测器具有增益高、噪声低、响应快和价格低等优点而独占鳌头。在 1.3~1.6 μm 波段,目前尚难以制作出性能可与 Si 器件相比拟的雪崩光电探测器。Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格材料的出现,使器件的设计与制造由原来的“杂质工程”发展成“能带工程”。它不仅与 Si 微电子工艺相容,而且随着 Ge 含量的改变能使其禁带宽度满足现代光纤通信器件的要求,是发展光电探测器的一种新型材料,也是国内外学者目前研究的热点之一。1986 年 Luryi^[1], Temkin^[2,3] 和 Pearsall^[4] 等人报道用 Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格(SLS)材料作光的吸收层,在 Si 片上制备出了可在 1.3~1.5 μm 波长范围工作的 PIN、雪崩光电探测器。本文对尚未实现的 n⁺-i-p-SLS-p⁺ 结构雪崩光电探测器进行优化分析与设计,以便使它早日出现在光纤通信系统中。

2 结构和原理

Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格雪崩光电探测器的优化结构如图 1 所示,它采用所谓高场-低场,吸收-倍增分开的结构。Ge_xSi_{1-x}/Si 应变超晶格在 $x = 0.6$ 时,是波长 1.3~1.6 μm 光的吸收区,光在其中可以激发电子-空穴对。吸收区内电场强度较低,应在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ V/cm 之间。这样,既不会引起碰撞电离,又可使光生载流子达到饱和漂移速度(约 10⁷ cm/s)。i-Si 区是雪崩倍增区,其中的电场要足够强,一般应 $\geq 3 \times 10^5$ V/cm。这样,从吸收区漂移过来的光生电子,能与 i 层中的 Si 原子发生碰撞电离,可以获得足够的电流增益。由于 Si 的电子与空穴的离化系数之比 $\kappa = \alpha/\beta \gg 1$,基本上可以做到纯电子注入倍增,使 Si 雪崩倍增器件的低噪声优点在

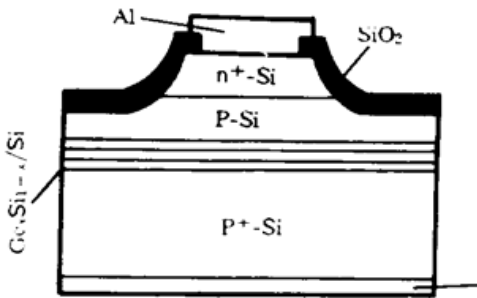


Fig. 1 Schematic diagram of optimum structure of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ superlattice APD

此得到利用。倍增区和吸收区之间的 p-Si 区,是高、低电场的过渡区,吸收区漂移过来的光生电子经它进入雪崩区。

当 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长的光从图 1 所示探测器 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格的横断面垂直入射时,将在其中产生电子-空穴对。在反向偏压作用下,光生空穴漂向 p⁻-Si 衬底一边,光生电子经 p-Si 区漂向 i-Si 雪崩倍增区,并在其中发生雪崩倍增,使光电流得到雪崩放大。这就是这种光电探测器的工作原理。

3 优化分析与设计

量子效率、响应速度、噪声因子是雪崩光电探测器的三个重要参数,也是优化分析与设计的依据。

3.1 p⁻-Si 衬底和缓冲层

衬底是探测器的基础,应有一定的强度,取 $400 \mu\text{m}$ 左右的厚度是合适的。为了减小体串联电阻,以便减小 RC 时间常数,提高响应速度,衬底应选重掺杂 ($\geq 10^{20} \text{cm}^{-3}$) 的 p⁻-Si。衬底的晶向对分子束外延法生长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层的晶体质量有影响。研究表明,〈111〉和〈110〉Si 衬底上生长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层易出现孪晶,而〈100〉Si 衬底上可以生长出缺陷密度低的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层,超晶格中 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 和 Si 层也都平整均匀。因此,p⁻-Si 衬底应选〈100〉晶向的单晶片。

p⁻- $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 缓冲层是 p⁻-Si 衬底到应变超晶格的过渡层,它可减小 Si 与应变超晶格的晶格常数之差别,对生长完美晶体材料是必不可少的。对 Si-MBE 法来讲,生长几个微米厚的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层是相当耗时费力的,所以采用组分线性缓变的薄 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层是合适的缓冲层。

3.2 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格是光的吸收层,为使波长 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的光能在其中激发电子-空穴对, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 的禁带宽度 $E_g(x)$ 应满足

$$E_g(x) < 1.24/\lambda \text{ (eV)} = 0.78 \text{ (eV)} \quad (\lambda = 1.6 \mu\text{m})$$

取 $E_g(x) = 0.68 \text{ eV}$,则根据 $E_g(x) = 1.12 - 0.74x$,可算得 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 中 Ge 的含量为 $x = 0.6$ 。

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 与 Si 的晶格常数不同, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 的厚度增大到某一定值时,应变能将通过产生失配位错释放出来。因此,Si 上生长 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 时存在一个临界厚度 h_c 。根据文献[1], h_c 可表示为

$$x^2 h_c \text{ (nm)} = 1.33 \ln[h_c \text{ (nm)} / 0.4] \quad (1)$$

当 $x = 0.6$ 时,从上式可以算得 $\text{Ge}_{0.6}\text{Si}_{0.4}$ 的 $h_c = 13 \text{ nm}$ 。

对于 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 交替组成的超晶格,若组分用等效组分 x_{SLS} 表示

$$x_{\text{SLS}} = [t_{\text{GeSi}} / (t_{\text{Si}} + t_{\text{GeSi}})]x = rx \quad (2)$$

其中, $r = t_{\text{GeSi}} / (t_{\text{Si}} + t_{\text{GeSi}})$, t_{GeSi} , t_{Si} 分别表示超晶格中 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层和 Si 层的总厚度。那么 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格的总临界厚度 H_c 也可用式(1)表示,即

$$x_{\text{SLS}}^2 H_c = 1.33 \ln(H_c / 0.4), \quad \text{或者} \quad (rx)^2 H_c = 1.33 \ln(H_c / 0.4) \quad (3)$$

从(3)式可见,对于 $r (= 0.6)$ 的一定取值,若能求得应变超晶格的最佳总临界厚度 H_c ,则 r 就可确定。应变超晶格中 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 和 Si 子层的厚度及总周期数也就不难确定了。 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 对波长 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的光的吸收系数较小,通常只有几十 cm^{-1} 。因此,为了提高量子效率,图 1 所示

的探测器应设计成波导形,光从其横端面垂直射入。若将应变超晶格作为吸收层,则光在其中的行为类似于在三层对称波导中的传输,如图 2 所示。光在吸收层中传播的 TE 模的本征值方程为

$$\begin{cases} (n_2^2 - n_1^2)(k_0 H_c/2)^2 = (k H_c/2)^2 + (\nu H_c/2)^2 & (4) \\ (k H_c/2) \tan(k H_c/2) = \gamma H_c/2 & (5) \end{cases}$$

其中 n_1 为 Si 的折射率 n_{Si} , $k_0 (= 2\pi/\lambda)$ 为真空波数, n_2 为应变超晶格的平均折射率 n_{SLS} , 为

$$n_2^2 = n_{\text{SLS}}^2 = (t_{\text{Si}}/p)n_{\text{Si}}^2 + (t_{\text{GeSi}}/p)n_{\text{GeSi}}^2 \quad (6)$$

其中 $p = t_{\text{Si}} + t_{\text{GeSi}}$, t_{Si} , t_{GeSi} 分别为应变超晶格中一个周期内 Si 层和 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层的厚度。 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层的折射率 n_{GeSi} 可用线性内插法近似求得 ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时, $n_{\text{Si}} = 3.5$, $n_{\text{Ge}} = 4.3$)

$$n_{\text{GeSi}} = n_{\text{Si}} + (n_{\text{Ge}} - n_{\text{Si}})x = 3.5 + 0.8x$$

将上式代入(6)式,并注意 $t_{\text{GeSi}}/p = r$, $t_{\text{Si}}/p = 1 - r$, 可得

$$n_2^2 = n_{\text{Si}}^2 + rx(5.6 + 0.64x) \quad (7)$$

因 $x = 0.6$, 若再将(3)式的 r 代入(7)式, 易见 n_2^2 只是 H_c 的函数。于是(4)式和(5)式的 k 、 ν 只是 H_c 的函数, 给定 H_c 就能求得相应的 k 、 ν 值。

有一部分光在应变超晶格层外, 这部分光不能被吸收。用限制因子 Γ 来表示光限制在有源的应变超晶格层内的程度, 根据文献[5], Γ 为

$$\Gamma = \left\{ 1 + \frac{\cos^2(k H_c/2)}{\nu [H_c/2 + 1/k \sin(k H_c/2) \cos(k H_c/2)]} \right\}^{-1} \quad (8)$$

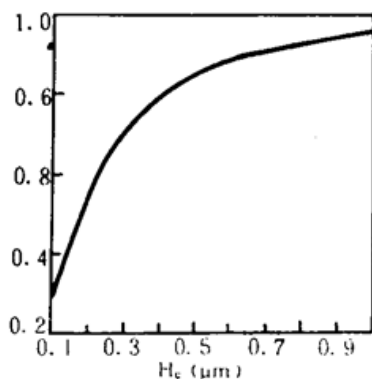


Fig. 3 Curve of Γ - H_c

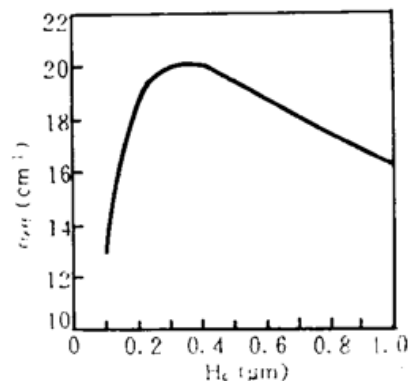


Fig. 4 Curve of α_{eff} - H_c

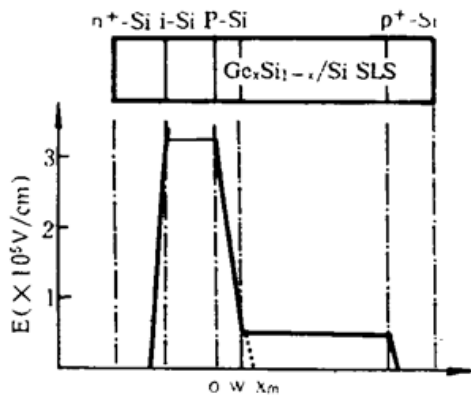
显然, 通过(4)式、(5)式、(7)式和(8)式可以算出 Γ - H_c 关系曲线, 如图 3 所示。应变超晶格的有效吸收系数 $\alpha_{\text{eff}} = r\Gamma\alpha$, 取 $\alpha = 100 \text{ cm}^{-1}$, 利用计算机也能求出 α_{eff} - H_c 的关系曲线, 如图 4 所示。由图 4 可见, $H_c = 340 \text{ nm}$ 时, α_{eff} 有最大值。也就是说, 在 $x = 0.6$, $H_c = 340 \text{ nm}$ 时, 应变超晶格对 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的光有效吸收最强, 量子效率也就最高。此时, 从(3)式可得

$$r = \sqrt{\frac{1.33 \ln[H_c(\text{nm})/0.4]}{H_c(\text{nm})}} \Bigg|_{x=0.271} \quad (9)$$

前已算得 $x = 0.6$ 时 $\text{Ge}_{0.6}\text{Si}_{0.4}$ 的临界厚度为 13 nm , 现取其厚度为 6 nm ($< 13 \text{ nm}$ 的临界厚度), 则不会产生失配位错。从 $r = 6 \text{ nm} / (6 \text{ nm} + t_{\text{Si}}) = 0.271$ 可以算得 $t_{\text{Si}} = 16 \text{ nm}$ 。应变超晶格的总周期数 $< H_c / (t_{\text{GeSi}} + t_{\text{Si}}) = 15.5$, 现取为 15。因 t_{GeSi} 的取值只要小于临界厚度 13 nm 都是可行的, 所以, t_{Si} 、 t_{GeSi} 和总周期数都不是唯一的。

3.3 p-Si 区和 i-Si 雪崩区

Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格雪崩光电探测器要能正常工作,其中的电场要满足一定的分布,如图 5 所示。应变超晶格中的电场强度应在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ V/cm 之间,前已分析过,不再赘述。i-Si 区的场强度 $\geq 3 \times 10^5$ V/cm,以便使从应变超晶格中漂移过来的光生电子在其中发生雪崩倍增。p-Si 区的场强是线性变化的,它把雪崩区的高场与吸收区的低场分开,起屏蔽高场的作用。



当反偏电压刚好使 p-Si 区完全耗尽时,解泊松方程可得 p-Si 区的最大场强 E_m (也即 i-Si 区的场强)为

$$E_m = qN_A x_m / \epsilon_0 \epsilon_r \quad (10)$$

Fig. 5 Electric field distribution of Ge_xSi_{1-x}/Si super lattice APD

其中, N_A 是 p 区(轻掺杂边)的掺杂浓度, x_m 是 p 区耗尽层宽度。为使响应速度快及分子束外延法生长容易, p 区应尽可能薄。因此, N_A 应取高些。若取 $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 那么在 $E_m = 3.15 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 情况下, 从(10)式可以算得 $x_m = 20.7 \text{ nm}$ 。因 p 区的最高和最低场强分别应为 $3.15 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 和 $5 \times 10^4 \text{ V/cm}$, 为满足此要求, p 区宽度 W 应满足

$$W/20.7 = (3.15 \times 10^5 - 5 \times 10^4) / 3.15 \times 10^5, \text{ 得 } W = 17.4 \text{ nm} \approx 17 \text{ nm}$$

现对雪崩区进行分析设计。随着反向偏压的增大, i-Si 雪崩区场强达到 $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 和 $3.3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 时, 空穴和电子的离化系数之比 $k' = \beta/\alpha$ 分别为 0.039 和 0.06。过剩噪声因子 $F(M)$ 可表示为

$$F(M) = k'M + (2 - 1/M)(1 - k') \quad (11)$$

其中, M 为雪崩倍增因子。因此, 可以算得两条 $F(M)$ - M 关系曲线, 如图 6 所示。对于光纤系统用的雪崩光电探测器, M 的最佳值在 50 ~ 100 之间, 从图 6 查得相应的过剩噪声因子 $F(M)$ 在 3.7 ~ 7.8 之间。

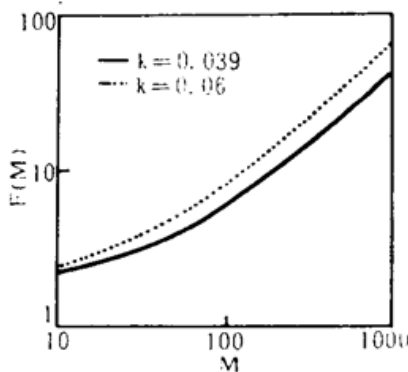


Fig. 6 Curve of $F(M)$ - M

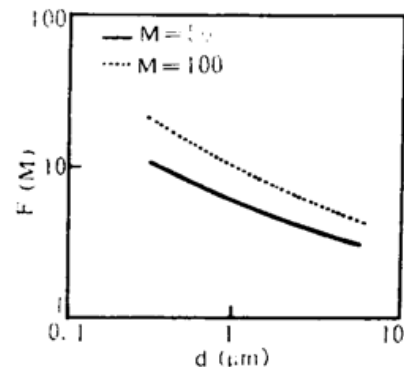


Fig. 7 Curve of $F(M)$ - d

这种雪崩光电探测器的雪崩倍增主要发生在 i-Si 区, 倍增因子 M 可表示为

$$M = \left\{ 1 - \int_0^d \alpha \cdot \exp \left[- \int_0^x (\alpha - \beta) dx' \right] dx \right\}^{-1} \quad (12)$$

其中, d 为 i-Si 雪崩区的厚度, $\alpha = 3.8 \times 10^6 \exp[-1.75 \times 10^6/E]$, $\beta = 2.25 \times 10^7 \exp[-3.26 \times 10^6/E]$ 。在 i-Si 区电场强度 E 是均匀的, 所以对于一定的 E, α, β 及 $k' (= \beta/\alpha)$ 均为常数, 上式就变为

$$M = \left\{ 1 + \frac{\alpha}{\alpha - \beta} [\exp((\beta - \alpha)d) - 1] \right\}^{-1} \quad (13)$$

根据(11)式和(13)式,在 $M = 50$ 和 100 的两种情况下,取不同的 E 值,可算出 $F(M)-d$ 关系曲线,如图 7 所示。可见, $F(M)$ 在 $3.7 \sim 7.8$ 之间变化时, i -Si 雪崩区的最佳厚度在 $1.8 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 之间。为提高响应速度和容易制作,实践中可取 $d = 1.8 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

3.4 n^+ -Si 层

n^+ -Si 层要求重掺杂, $N_D \geq 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。同时该层要尽可能薄,只要 Al 合金时的“穿刺”不穿透它即可。因此其厚度取为 $200 \sim 300 \text{nm}$ 是合适的。

结束语 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格雪崩光电探测器,是把 $\text{Ge}_{0.6}\text{Si}_{0.4}$ 可以探测 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的光和 Si 雪崩倍增噪声低这两个特点结合在一起的产物,其中超晶格吸收区、 p -Si 区和 i -Si 雪崩倍增区是设计的关键。本文通过理论分析和优化设计得到: i -Si 雪崩区厚为 $1.8 \sim 2 \mu\text{m}$; p -Si 区的 $N_A = 10^{18} \text{cm}^{-3}$,厚为 17nm ; $\text{Ge}_{0.6}\text{Si}_{0.4}/\text{Si}$ 超晶格总厚为 340nm 。显然,这在工艺上是完全可以实现的。

参 考 文 献

- [1] S. Luryi, T. P. Pearsall, H. Temkin. Waveguide infraed photodetector on a silicon chip. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, EDL-7(2): 104~107
- [2] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ strained-layer superlattices waveguide photodetectors operating near $1.3 \mu\text{m}$. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(5): 963~964
- [3] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, $\text{Ge}_{0.6}\text{Si}_{0.4}$ rib waveguide avalanche photodetectors for $1.3 \mu\text{m}$ operation. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(13): 809~810
- [4] T. P. Pearsall, H. Temkin, J. C. Bean *et al.*, Avalanche gain in $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ infrared waveguide detector. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, EDL-7(5): 330~332
- [5] H. C. Casey, *Heterostructure Lasers*. New York: Academic, 1978, 54~57

Analysis and Optimum Design on $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Strained-Layer Superlattices Avalanche Photodetector

Li Guozheng Zhang Hao

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

(Received 26 March 1995)

Abstract The $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer superlattices avalanche photodetector has been studied and optimum designed. Its optimum structure parameters are: the thickness of i -Si avalanche region is $1.8 \sim 2 \mu\text{m}$; the carrier concentration of p -Si region is 10^{18}cm^{-3} and thickness is 17nm ; the total thickness of superlattices is 340nm . The detector can be operated in the range of $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$.

Key words GeSi , strained-layer superlattice, avalanche photodetector (APD).