

浙江大学

本科设计报告

课程名称: 信息电子学物理基础

设计名称: PN 结设计

姓 名:

学 号:

学 院: 信电学院

专 业: 电子科学与技术

班 级:

指导老师:

2020 年 12 月 21 日

目录

| | | |
|----------|-------------------------|----------|
| 1 | 设计指标与要求 | 3 |
| 1.1 | pn 结二极管的设计指标与要求 | 3 |
| 1.2 | pn 结的材料参数 | 3 |
| 2 | 工程技术考虑与设计 | 4 |
| 2.1 | pn 结二极管设计指标与要求的具体处理 | 4 |
| 2.2 | 设计 pn 结二极管的施主掺杂与受主掺杂的关系 | 5 |
| 2.3 | 设计施主浓度的最小值 | 5 |
| 2.4 | 设计施主浓度的最大值 | 5 |
| 2.5 | 确定施主浓度的范围与受主浓度的范围 | 6 |
| 2.6 | 社会与环境方面的考虑 | 6 |
| 3 | 设计总结 | 6 |

1 设计指标与要求

1.1 pn 结二极管的设计指标与要求

设计名称: PN 结的初步设计

设计指标与要求:

- (1) 工作温度: $300K$;
- (2) 开启电压小于 $0.800V$;
- (3) 正偏时, 空穴与电子对电流的贡献相同;
- (4) 反偏为 $5V$ 时, 结电容小于 $1.50 \times 10^{-9} F/cm^2$;
- (5) 反偏时, 电流密度小于 $1.20 \times 10^{-8} A/cm^2$;

1.2 pn 结的材料参数

| 物理性质 | Si | GaAs | Ge |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 原子密度(cm^{-3}) | 5.0×10^{22} | 4.42×10^{22} | 4.42×10^{22} |
| 原子量 | 28.09 | 144.6 | 72.59 |
| 晶体结构 | 金刚石 | 辉锌矿 | 金刚石 |
| 密度($g \cdot cm^{-3}$) | 2.33 | 5.32 | 5.33 |
| 晶格常数(\AA) | 5.431 | 5.653 | 5.657 |
| 熔点($^{\circ}C$) | 1415 | 1238 | 937 |
| 介电常数 | 11.7 | 13.1 | 16.0 |
| 禁带宽度 | 1.12 | 1.43 | 0.66 |
| 电子亲和势 $\chi(eV)$ | 4.01 | 4.07 | 4.13 |
| 导带的有效态密度 $N_C(cm^{-3})$ | 2.8×10^{19} | 4.7×10^{17} | 1.04×10^{19} |
| 价带的有效态密度 $N_V(cm^{-3})$ | 1.04×10^{19} | 7.0×10^{18} | 6.0×10^{18} |
| 本征载流子浓度(cm^{-3}) | 1.5×10^{10} | 1.8×10^6 | 2.4×10^{13} |
| 迁移率($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$) | | | |
| 电子 μ_n | 1350 | 8500 | 3900 |
| 空穴 μ_p | 480 | 400 | 1900 |

图 1.1: 硅、砷化镓和锗的性质 ($T = 300K$)

| 材料 | Si | Ge | GaAs |
|------------------------------|----|-----|--------------------|
| 少数载流子寿命 (μs , 少子 = 空穴) | 10 | 200 | 5×10^{-3} |

表 1.1: 硅、砷化镓和锗的少数载流子寿命

2 工程技术考虑与设计

2.1 pn 结二极管设计指标与要求的具体处理

由图 2.1 可知, Si 材料的特性决定了 Si 半导体 PN 结的开启电压在 0.7V 左右, Ge 半导体 PN 结的开启电压在 0.3V 左右, GaAs 半导体 PN 结的开启电压在 1.1V 左右。因此 GaAs 材料不符合开启电压小于 0.8V 的要求, 首先排除在外。

另外, 由表 1.1 可知, GaAs 的少子寿命时间非常低, 因此会导致反偏时电流密度可能过大。

综上考虑, 本次设计采用 Si 半导体材料。

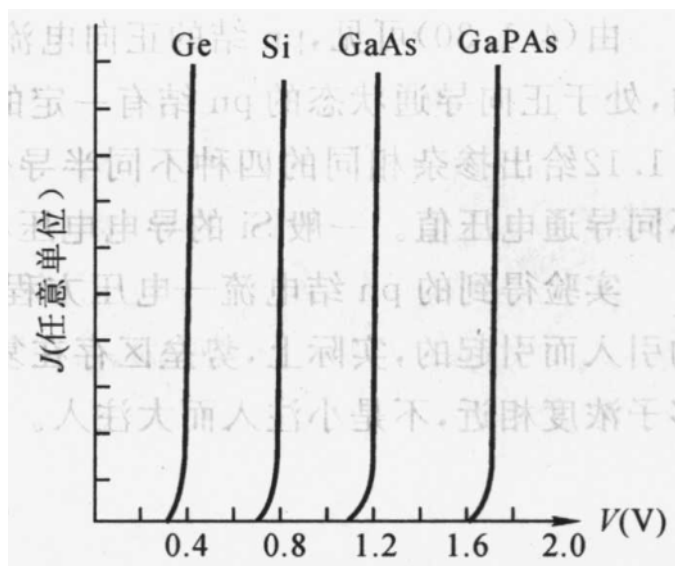


图 2.1: Ge, Si, GaAs 和 GaPAs 的 pn 结正向特性

根据爱因斯坦关系 (扩散系数与迁移率), 确定扩散系数:

$$D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n = 0.0259 \times 1350 = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p = 0.0259 \times 480 = 12.4 \text{ cm}^2/\text{s}$$

最终, 我们给出 pn 结材料的参数如下表所示:

| | |
|---|----------------------|
| 材料 | Si |
| 本征载流子浓度 (cm^{-3}) | 1.5×10^{10} |
| 电子迁移率 $\mu_n(cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$ | 1350 |
| 空穴迁移率 $\mu_p(cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$ | 480 |
| 少数载流子寿命 (μs) | 10 |
| 介电常数 | 11.7 |
| 扩散系数 $D_n(cm^2/s)$ | 35 |
| 扩散系数 $D_p(cm^2/s)$ | 12.4 |

表 2.1: pn 结材料参数

2.2 设计 pn 结二极管的施主掺杂与受主掺杂的关系

正偏时，电子电流密度和空穴电流密度的计算公式如下：

$$J_n = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] = \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$J_p = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] = \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

为了使电子电流和空穴电流贡献度相同，令二者相等，并代入相关参数计算可得：

$$N_A = 1.678 N_D$$

2.3 设计施主浓度的最小值

为满足反偏时的饱和电流密度小于 $1.20 \times 10^{-8} A/cm^2$ ：

$$|J| = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} = J_S < 1.20 \times 10^{-8} A/cm^2$$

带入参数可以算得：

$$N_D > 6.70 \times 10^{12} cm^{-3}$$

2.4 设计施主浓度的最大值

为满足反偏为 $5V$ 时，结电容小于 $1.50 \times 10^{-9} F/cm^2$ ：

$$C_B = \sqrt{\frac{e\epsilon_r\epsilon_0 N_A N_D}{2(V_D + V_R)(N_A + N_D)}} < 1.50 \times 10^{-9} F/cm^2$$

其中 V_D 由下式算得：

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

带入参数计算得：

$$N_D < 2.39 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$$

2.5 确定施主浓度的范围与受主浓度的范围

最终确定掺杂浓度的范围如下：

$$N_A = 1.678 N_D$$

$$6.70 \times 10^{12} \text{cm}^{-3} < N_D < 2.39 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$$

$$1.12 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} < N_A < 4.01 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$$

2.6 社会与环境方面的考虑

半导体产业是高能耗高污染产业，芯片制造业涉及 300 多种不同性质的原料和溶剂，产生的典型污染物包括：

- (1) 晶片生产：蒸汽态砷、磷、硫化物；
- (2) 金属化：有机酸、无机酸、重金属；
- (3) 光刻显影：各种有机溶剂，挥发性有机废气；
- (4) 干/湿刻蚀：氟化物、氢氟酸等；
- (5) 淀积成膜：各种气态污染物；
- (6) 掺杂：含砷、锑、磷、硼的污染物；
- (7) 清洗：重金属废水，酸碱废液。

应从以下几方面减小半导体生产过程中的污染物排放：

- (1) Cleanroom 的废气收集管理；
- (2) 水循环利用；
- (3) 提高管理和工艺控制水平，提高化学药品的利用率，减少浪费；
- (4) 开发新工艺、新技术，减少和代替有毒有害污染物质的使用（氟化物的消减）。

3 设计总结

根据设计指标要求，通过参数查阅、分析比较，我们采用了 Si 材料作为 pn 结设计的材料，然后通过参数计算给出了掺杂浓度的范围及掺杂浓度之间的关系，最后从社会与环境的角度对设计的实际效应作了简要分析。最终的设计基本满足了最初的设计要求与条件。