



信息电子学物理基础 设计报告

实验名称 PN 结设计

姓 名

学 号

指导老师 汪小知

PN 结设计

摘要 PN 结是半导体器件中的基本结构，由 P 型半导体和 N 型半导体通过特殊工艺结合而成。利用其多种特性可以制成二极管、稳压二极管、光电二极管等多种器件，因此广泛应用于各种电子设备和电路中，是现代信息电子技术的基础。

本文基于给出的设计指标，针对开启电压、结电容、反向饱和电流密度等指标进行设计，最终给出了一种符合要求的 PN 结设计。并对其设计进行了性能、社会与环境方面的综合评估。

关键词 PN 结；开启电压；半导体

Contents

1	设计背景和指标	1
2	PN 结设计	1
2.1	材料选择	1
2.2	PN 结相关参数设计	2
2.3	小结	4
3	生产安全防护与社会环境评估	5
3.1	生产安全防护	5
3.2	社会环境评估	5

1 设计背景和指标

PN 结是半导体器件中的基本结构，由 P 型半导体和 N 型半导体通过特殊工艺结合而成。P 型半导体中主要含有带正电的空穴作为载流子，而 N 型半导体中主要含有带负电的电子作为载流子。当 P 型和 N 型半导体结合时，由于载流子的浓度差异，电子从 N 区向 P 区扩散，空穴从 P 区向 N 区扩散，导致在结合面附近形成一个电场，称为内建电场。这个电场阻止了进一步的扩散，形成了一个稳定的平衡状态，即 PN 结。

现要求设计一个 PN 结，设计指标如下：

- (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 $1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$
- (5). 反偏时，电流密度小于 $1.30 \times 10^{-8} A/cm^2$

要求中还给出了不同材料的少数载流子寿命如下：

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

Table 1: 不同材料的少数载流子寿命

2 PN 结设计

2.1 材料选择

按照题目的规定，我们可以从 Si、Ge、GaAs 三个材料中选择。书中给出了不同材料的 PN 结正向特性如下：

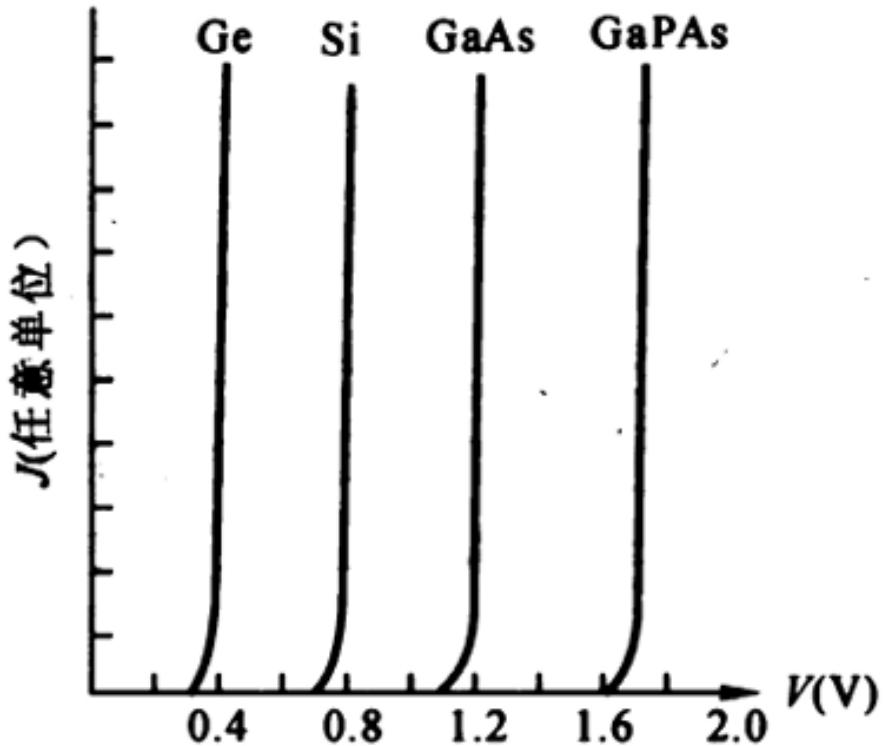


Figure 1: 不同材料的 PN 结正向特性

可以明显看出，只有 Si 和 Ge 的开启电压小于 0.800V；而 Si 半导体材料加工技术是目前最成熟的，在 PN 结中的应用也最常见，其 PN 结开启电压在 0.7V 左右，符合设计指标。因此综合考虑，选择以 Si 为本设计的 PN 结材料。

2.2 PN 结相关参数设计

查阅资料可以得知以下表作为半导体不同材料的物理性质参数，其中第一列为我们
要使用的 Si 材料的参数：

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($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.33	5.32	5.33
晶格常数(Å)	5.431	5.653	5.657
熔点(℃)	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 $\chi(\text{eV})$	4.01	4.07	4.13
导带的有效态密度 $N_C(\text{cm}^{-3})$	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	1.04×10^{19}
价带的有效态密度 $N_V(\text{cm}^{-3})$	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($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)			
电子 μ_n	1350	8500	3900
空穴 μ_p	480	400	1900

Figure 2: 不同半导体材料参数

据此，我们可以根据要求开始设计 PN 结。

(1). 指标要求 PN 结正偏时，空穴与电子对电流的贡献相同。

首先，根据爱因斯坦关系，确定扩散系数：

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

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

据此可计算电子和空穴扩散电流密度：

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

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

为使贡献度相等，令 $J_n = J_p$ ，可以得到：

$$N_A = 1.678 N_D$$

(2). 指标要求 PN 结反偏为 5V 时，结电容小于 $1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$

由此可以得到：

$$C_B = \sqrt{\frac{e\epsilon_S N_A N_D}{2(V_D + V_R)(N_A + N_D)}} < 1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$$

而其中 V_D 为内建电势，满足：

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

最终计算得出：

$$N_D < 2.720 \times 10^{14} cm^{-3}$$

$$N_A < 4.564 \times 10^{14} cm^{-3}$$

(3). 指标要求 PN 结反偏时，电流密度小于 $1.30 \times 10^{-8} A/cm^2$

由此可以得到：

$$J_s = \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{D_n/\tau_{n0}} + \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{D_p/\tau_{p0}} < 1.30 \times 10^{-8} A \cdot cm^{-2}$$

计算得出：

$$N_D > 6.175 \times 10^{12} cm^{-3}$$

$$N_A > 1.036 \times 10^{13} cm^{-3}$$

2.3 小结

综上，我们给出 PN 结设计的结果如下：

材料选择 Si, 施主掺杂浓度和受主掺杂浓度范围如下：

$$6.175 \times 10^{12} cm^{-3} < N_D < 2.720 \times 10^{14} cm^{-3}$$

$$1.036 \times 10^{13} cm^{-3} < N_A < 4.564 \times 10^{14} cm^{-3}$$

且必须满足

$$N_A = 1.678 N_D$$

3 生产安全防护与社会环境评估

3.1 生产安全防护

- (1). 硅基半导体生产过程中需要高温扩散和退火工艺，温度通常在 900°C 到 1200°C 之间。操作人员需穿戴防护服和手套，避免直接接触高温设备。同时要定期检查和维护高温设备，防止设备故障。
- (2). 生产过程中使用多种化学品，如光刻胶、刻蚀液、清洗剂等。这些化学品可能具有腐蚀性、毒性或易燃性，操作人员需穿戴防护服、手套、口罩和护目镜。
- (3). 生产设备（如扩散炉、离子注入机、光刻机）操作复杂，可能存在机械伤害风险。设备周围要设置安全警示标志，提醒操作人员注意安全。
- (4). 要额外注意的是，半导体生产对静电非常敏感，静电放电可能导致器件损坏。操作人员需穿戴防静电服和防静电鞋。

3.2 社会环境评估

- (1). 硅基半导体生产过程中需要高温处理，生产过程中的光刻和刻蚀工艺也需要大量能源，能耗较高。因此十分有必要将生产过程中产生的废料和副产品通过回收和再利用减少资源浪费。比如废硅片可以回收用于低端的应用（如太阳能电池）。
- (2). 生产过程中会产生废液、废气和固体废弃物，需要妥当的回收处理。
- (3). 生产过程中需要大量水资源用于清洗和冷却。这不仅可能对当地水资源造成压力，产生的废气和废水还可能对周边社区的健康造成影响。因此要采用节能技术和环保工艺，减少生产过程中的能源消耗和环境污染。