

浙江大学

《信息电子学物理基础》 设计报告



题目 PN 结设计

姓名

学号

专业 电子科学与技术

教学班 周四上午第 3、4、5 节

任课老师 林时胜

摘 要

PN 结是半导体器件中最常见、最基本的结构。据 PN 结的材料、掺杂分布、几何结构和偏置条件的不同，利用其基本特性可以制造多种功能的晶体二极管。此外，利用两个 PN 结之间的相互作用可以制作双极型晶体管、场效应管等有源器件，产生放大、振荡等多种电子功能。PN 结是大部分有源器件的核心，是现代电子信息技术的基础。

本文通过对 PN 结材料、掺杂浓度等参数的分析和计算，针对开启电压、结电容、反向饱和电流密度等指标进行设计，给出了一种性能良好、适合在常见环境下工作的 PN 结设计方案。

关键词：PN 结 开启电压 结电容 反向饱和电流

目录

- 1.设计背景和设计要求的.....4
- 2.方案分析与设计.....4
 - 2.1.半导体材料选择的.....4
 - 2.2.相关参数计算的.....5
 - 2.3.小结.....6
- 3. 生产安全防护和社会环境因素的.....6
- 4.总结.....7
- 参考文献.....8

1.设计背景和设计要求

PN 结是半导体器件中最为常见的结构。利用其开关特性、伏安特性、电容特性，可制作为整流、开关及其他用途的器件，也是半导体微波器件及光电器件的基本结构。同时，PN 结也是双极型晶体管、可控硅整流器和场效应晶体管的基本组成部分，利用两个 PN 结之间的相互作用可以产生放大、振荡等多种电子功能。在信息、半导体产业高速发展的现在，PN 结是大部分有源器件的核心，是现代电子信息技术的基础。现要求设计一个 PN 结，要求如下：

- （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 $1.30 \times 10^{-8}A/cm^2$ ；

2.方案分析与设计

2.1.半导体材料选择

PN 结常用的半导体材料有 Si、Ge、GaAs、GaPAs 等。图 2.1 给出了这些材料对应的 PN 结正向特性。由图可知，GaAs、GaPAs 材料的开启电压在 0.800V 以上，不符合本次设计的要求。

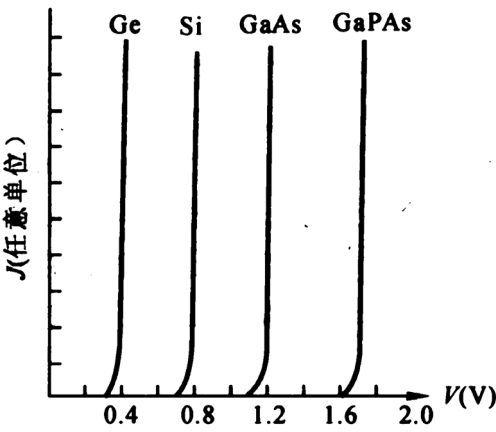


图 2.1 常见材料的 PN 结正向特性

表 2.1 Si、Ge、GaAs 部分性质参数

材料	Si	Ge	GaAs
少数载流子寿命 (μs ，电子=空穴)	10	200	5×10^{-3}
本征载流子浓度 (cm^{-3})	1.5×10^{10}	2.4×10^{13}	1.8×10^6

PN 结的反向饱和电流密度可用式 2-1 描述：

$$J_s = \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{D_n/\tau_{n0}} + \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{D_p/\tau_{p0}} \quad (2-1)$$

式中 D_n 为电子扩散系数， D_p 为空穴扩散系数， N_A 为受主掺杂浓度， N_D 为施主掺杂浓度， n_i 为本征载流子浓度， τ_{n0} 为少子电子寿命， τ_{p0} 为少子空穴寿命。对比 Si 和 Ge 材料，发现虽然 Si 的少子寿命是 Ge 的1/20，但 Si 的本征载流子浓度比 Ge 要低 3 个数量级，经过平方后便是 6 个数量级；而扩散系数的相差不超过 1 个数量级。为了满足反偏时电流密度的要求，选用 Si 比选用 Ge 更合适。

综上所述，本次设计选择 Si 作为半导体材料。

2.2.相关参数计算

Si 材料的部分物理性质参数（T=300K）由表 2.2 给出。

表 2.2 Si 的部分物理性质参数（T=300K）

物理性质		值
原子密度（ cm^{-3} ）		5.0×10^{22}
原子量		28.09
晶体结构		金刚石
密度（ $g \cdot cm^{-3}$ ）		2.33
晶格常数（Å）		5.431
熔点（°C）		1415
相对介电常数 ϵ_s		11.7
禁带宽度（eV）		1.12
电子亲合势 χ （eV）		4.01
导带的有效态密度 N_C （ cm^{-3} ）		2.80×10^{19}
价带的有效态密度 N_V （ cm^{-3} ）		1.04×10^{19}
本征载流子浓度（ cm^{-3} ）		1.50×10^{10}
迁移率 （ $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ）	电子 μ_n	1350
	空穴 μ_p	480
少数载流子寿命（ μs ，电子=空穴）		10.0
电子扩散系数 D_n （ $cm^2 \cdot s^{-1}$ ）		35.0
空穴扩散系数 D_p （ $cm^2 \cdot s^{-1}$ ）		12.4

其中电子扩散系数、空穴扩散系数可根据爱因斯坦关系得出：

$$D_n = \frac{k_B T \mu_n}{e} \quad (2-2)$$

$$D_p = \frac{k_B T \mu_p}{e} \quad (2-3)$$

正偏时，电子电流密度和空穴电流密度的计算公式如下：

$$J_n = \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2-4)$$

$$J_n = \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2-5)$$

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：

$$\frac{N_A}{N_D} = \frac{\sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}}}{\sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}}} = 1.68 \quad (2-6)$$

为满足反向饱和电流 $J_s < 1.30 \times 10^{-8} A/cm^2$ ：

$$J_s = \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{D_n/\tau_{n0}} + \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{D_p/\tau_{p0}} < 1.30 \times 10^{-8} A \cdot cm^{-2} \quad (2-7)$$

代入式 2-6，得出：

$$N_D > 6.17 \times 10^{12} cm^{-3} \quad (2-8)$$

$$N_A > 1.04 \times 10^{13} cm^{-3} \quad (2-9)$$

为满足反偏为 5V 时，结电容小于 $1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$ ：

$$C_j = \left\{ \frac{e\epsilon_0\epsilon_s N_A N_D}{2(V_D + V_R)(N_A + N_D)} \right\}^{\frac{1}{2}} < 1.60 \times 10^{-9} F \cdot cm^{-2} \quad (2-10)$$

其中 V_D 为内建电势：

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2-11)$$

联立式 2-6、式 2-10、2-11，得出：

$$N_D < 2.72 \times 10^{14} cm^{-3} \quad (2-12)$$

$$N_A < 4.57 \times 10^{14} cm^{-3} \quad (2-13)$$

2.3.小结

综上，选择 Si 作为 PN 结的半导体材料，掺杂浓度的范围为：

$$6.17 \times 10^{12} cm^{-3} < N_D < 2.72 \times 10^{14} cm^{-3} \quad (2-14)$$

$$1.04 \times 10^{13} cm^{-3} < N_A < 4.57 \times 10^{14} cm^{-3} \quad (2-15)$$

且满足：

$$N_A = 1.68 N_D$$

3. 生产安全防护和社会环境因素

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，很容易产生环境污染。根据半导体器件的生产流程，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) 洁净室的废气收集管理；

(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，减少和代替有毒有污染物质的使用（氟化物的消减）；

(5) 严格按照有关标准处理废水废气废渣，减小环境破坏。

此外，长期处于半导体生产加工线会对操作人员的身体健康产生影响。常见的职业危害包括有毒化学物质，包含四氯化碳、苯类、三氯乙烯、酸类、环己酮、丙酮、铅等，此外还存在噪声、金属粉尘、高频、电离辐射等有害因素。为了减小这种危害，首先应制定规范的生产操作流程和突发情况应对流程，为操作人员配备符合要求的保护装备，做好员工培训，提升操作人员技术水平；其次应定期组织员工体检，尽可能早地发现潜在的慢性疾病；最后应做好员工福利和补贴工作。

4.总结

本文通过参数查阅、分析比较等方法，首先根据开启电压和反向饱和电流密度的要求，确认采用 Si 材料作为 PN 结设计的材料，然后结合相关物理公式，根据反向饱和电流密度、结电容、正向电流中载流子贡献三项指标要求确定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设计指标的要求与条件。

参考文献

- [1] 杨冬晓, 陈秀峰. *现代信息电子学物理*. 杭州: 浙江大学出版社, 2007, 88-100.