

# 浙江大学

## 本科实验报告

PN 结设计

|       |           |
|-------|-----------|
| 课程名称: | 信息电子学物理基础 |
| 姓名:   |           |
| 学院:   | 信息与电子工程学院 |
| 专业:   |           |
| 学号:   |           |
| 指导老师: | 汪小知       |

December 15, 2023

# 目 录

|                 |   |
|-----------------|---|
| 一、设计指标与材料       | 3 |
| 1. PN 结设计指标     | 3 |
| 2. 材料参数         | 3 |
| 二、参数设计与范围确定     | 3 |
| 1. 材料选取与基本参数确定  | 3 |
| 2. 施主浓度与受主浓度的确定 | 4 |
| 三、工程考虑与环境需求     | 6 |
| 1. PN 结制备工艺     | 6 |
| 2. 工程考虑         | 6 |
| 3. 环境需求         | 7 |

## 一、 设计指标与材料

### 1. PN 结设计指标

- (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. 材料参数

| 物理性质               | Si                    | GaAs                  | Ge                    |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 原子密度 ( $cm^{-3}$ ) | $5 \times 10^{22}$    | $4.42 \times 10^{22}$ | $4.42 \times 10^{22}$ |
| 原子量                | 28.09                 | 144.6                 | 72.59                 |
| 密度                 | 2.33                  | 5.32                  | 5.33                  |
| 晶格常数               | 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              | 4.01                  | 4.07                  | 4.13                  |
| $N_c$              | $2.8 \times 10^{19}$  | $4.7 \times 10^{17}$  | $1.04 \times 10^{19}$ |
| $N_v$              | $1.04 \times 10^{19}$ | $7 \times 10^{18}$    | $6 \times 10^{18}$    |
| 本征载流子浓度            | $1.5 \times 10^{10}$  | $1.8 \times 10^6$     | $2.4 \times 10^{13}$  |
| $\mu_n$            | 1350                  | 8500                  | 3900                  |
| $\mu_p$            | 480                   | 400                   | 1900                  |
| 少数载流子寿命            | 10                    | 200                   | $5 \times 10^{-3}$    |

## 二、 参数设计与范围确定

### 1. 材料选取与基本参数确定

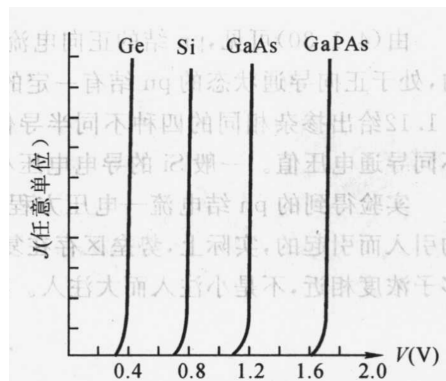


Figure 1: 不同材料 PN 结正向特性

如图 1 所示，为使我们的开启电压小于 0.8V，我们需要选取满足开启电压小于 0.8V 的材料，而从图中我们可以得到，GaAs 的开启电压为 1.1V 左右，所以排除在外，Si 和 Ge 能够满足要求。

根据扩散系数与迁移率的关系，我们可以确定扩散系数：

Si:

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

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

Ge:

$$D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n = 0.0259 \times 3900 = 101.01 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p = 0.0259 \times 1900 = 49.21 \text{ cm}^2/\text{s}$$

所以，可以得到如下的材料参数表：

| 材料      | Si                    | Ge                    |
|---------|-----------------------|-----------------------|
| 晶格常数    | 5.431                 | 5.657                 |
| 熔点      | 1415                  | 937                   |
| 介电常数    | 11.7                  | 16.0                  |
| 禁带宽度    | 1.12                  | 0.66                  |
| 电子亲和势   | 4.01                  | 4.13                  |
| $N_c$   | $2.8 \times 10^{19}$  | $1.04 \times 10^{19}$ |
| $N_v$   | $1.04 \times 10^{19}$ | $6 \times 10^{18}$    |
| 本征载流子浓度 | $1.5 \times 10^{10}$  | $2.4 \times 10^{13}$  |
| $\mu_n$ | 1350                  | 3900                  |
| $\mu_p$ | 480                   | 1900                  |
| $D_n$   | 35                    | 101.01                |
| $D_p$   | 12.4                  | 49.21                 |
| 少数载流子寿命 | 10                    | $5 \times 10^{-3}$    |

## 2. 施主浓度与受主浓度的确定

我们先计算 Si 的参数。

电子和空穴的电流密度如下所示：

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

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

由于再正偏时，电子和空穴的电流密度相同，所以有：

$$J_n = J_p$$

$$\frac{e n_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} [\exp(\frac{e V_F}{k_B T}) - 1] = \frac{e n_i^2}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}} [\exp(\frac{e V_F}{k_B T}) - 1]$$

解之可得关系式：

$$N_A = 1.678N_D$$

又因为，反偏为 5V 时，结电容小于  $1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$ ，所以有满足下式：

$$C_B = \sqrt{\frac{e\epsilon_r\epsilon_0 N_A N_D}{2(V_D + V_R)(N_A + N_D)}} < 1.60 \times 10^{-9} F/cm^2$$

其中， $V_D$  可表示为：

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

借助如下代码：

```
1  clc;clear;close all;
2
3  syms ND;
4  NA=1.678*ND;
5  ni=1.5e10;
6  VD=0.0259*log((NA*ND)/(ni^2));
7  e=1.6e-19;
8  epr=11.7;
9  ep0=8.85e-12;
10 VR=5;
11
12 CB=sqrt((e*epr*ep0*NA*ND)/(2*(VD+VR)*(NA+ND)))-1.6e-5;
13
14 ans=solve(CB,ND)*10^(-6)
```

得到：

$$N_D < 3.079 \times 10^{14} cm^{-3}$$

$$N_A < 5.167 \times 10^{14} cm^{-3}$$

在反偏时，饱和电流要小于  $1.30 \times 10^{-8} A/cm^2$ 。

$$J_s = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} < 1.30 \times 10^{-8} A/cm^2$$

可以解得：

$$N_D > 6.18 \times 10^{12} cm^{-3}$$

$$N_A > 1.04 \times 10^{13} cm^{-3}$$

所以综上所述，可以得到 Si 的施主浓度和受主浓度的取值范围：

$$6.18 \times 10^{12} cm^{-3} < N_D < 3.079 \times 10^{14} cm^{-3}$$

$$1.04 \times 10^{13} cm^{-3} < N_A < 5.167 \times 10^{14} cm^{-3}$$

而当我们计算 Ge 的施主浓度和受主浓度范围时，我们会得到：

$$N_D < 2.24 \times 10^{14} cm^{-3}, N_D > 1.00 \times 10^{19} cm^{-3}$$

所以，用 Ge 作为材料无法得到有效的施主浓度和受主浓度范围，故排除 Ge 材料。

### 三、 工程考虑与环境需求

#### 1. PN 结制备工艺

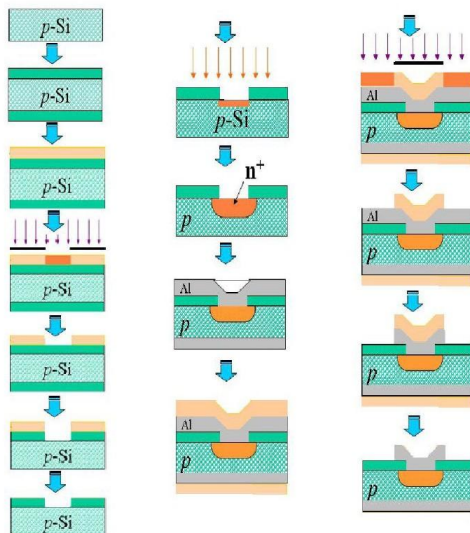


Figure 2: PN 结制备

1. p-Si 材料准备工作: 单晶硅片 (平整、无缺陷) 制备, 将硅片表面化学清洗;
2. 氧化: 二氧化硅薄膜制备, 双面氧化;
3. 涂胶: 涂光刻胶 (聚乙烯肉桂酸脂), 涂胶后对光刻胶的加固过程: 烘烤;
4. 曝光: 曝光之前制作掩膜覆盖, 在氧化层上刻出扩散窗口, 最终成为 P/N 结二极管的位置;
5. 显影: 用显影液去除曝光后硅片上光致蚀剂的过程, 显影后还有一步烘烤的工艺: 坚膜; 用于除去剩余光刻胶, 光刻胶对下一工序腐蚀液有抗蚀能力, 这样才能保证将硅片上无光刻胶膜保护的氧化层去净;
6. 腐蚀: 腐蚀液只能对二氧化硅、铝膜、铬膜等起腐蚀作用, 而对硅和其它材料不起作用;
7. 去胶: 将光刻胶清洗掉;
8. 杂质扩散: 这是杂质的预沉淀, 硅片经过适当清洗后, 根据不同二极管类型要求, 扩散不同的杂质;
9. 驱入: 硅片再经适当清洗后, 进行杂质的再分布, 在未被氧化层保护的区域形成  $n^+ - p$  结 (“+”表示高掺杂);
10. 金属化: 将器件与外部连接起来; 淀积金属膜有溅射和蒸发两种方法, 通常还需要在低温下退火来改善金属层与硅之间的接触阻抗;
11. 涂胶: 通过光刻胶去除扩散结区之外多余的金属膜;
12. 曝光 Mask2 板: 黑色部分不透光, 四周白色部分为刻蚀金属的位置;
13. 显影;
14. 腐蚀: 将边上金属腐蚀清除;
15. 去胶: 完成金属化接触后, 对器件进行塑封或则密封在金属管壳内。

#### 2. 工程考虑

1. 洁净度: 制备 PN 结的过程需要在洁净的环境中进行, 以防止杂质和污染对半导体材料的影响。实验室应该具备一定的洁净度要求, 例如使用洁净室或者其他洁净环境。

2. 温度控制：制备 PN 结时，通常需要控制温度以确保材料的稳定性和性能。温度的控制对于控制材料的晶体结构和杂质扩散非常重要。

3. 湿度控制：湿度对于一些半导体材料的制备过程也可能有影响。湿度的控制有助于防止材料吸湿或氧化，影响器件的性能。

4. 气氛控制：制备 PN 结时，所处的气氛也是重要的因素。一些半导体材料在特定气氛下反应较好，因此需要在控制的气氛中进行制备。

5. 真空条件：在一些特殊情况下，制备 PN 结可能需要在真空条件下进行，以排除气氛中的杂质和氧气对半导体材料的影响。

6. 化学品：制备 PN 结可能涉及使用一些特定的化学品和溶剂，需要注意它们的质量和纯度，以及在使用过程中的安全性。

7. 仪器设备：使用高质量的仪器设备对于确保制备的成功和 PN 结性能的稳定性也是至关重要的。

### 3. 环境需求

化学品使用与管理：使用环保型、低毒或者可再生的化学品是一种常见的环保实践。此外，正确管理和储存化学品，以防止泄漏和污染，也是至关重要的。

废弃物处理：废弃物的处理需要符合环保法规。废弃的化学品和溶剂应该经过适当的处理，以防止对环境造成污染。可以考虑进行废物分类，将可回收物质回收再利用。

能源利用：尽可能地优化实验室设备和仪器的能源利用效率，例如合理使用实验室照明、通风和制冷设备。采用能效较高的仪器和设备也是一种环保实践。

水资源管理：如有可能，尽量减少水的使用，并确保实验室内的水资源使用符合环保标准。回收和循环利用水资源也是一种环保的做法。

防止空气污染：控制实验室排放，防止有害气体和颗粒物进入大气中。使用高效的排气和净化设备，以降低对环境的不良影响。

生物安全：在实验室操作中，如果涉及到对生物材料的处理，需要遵循相应的生物安全标准，以防止对环境和人类健康造成潜在威胁。

## References

- [1] "IEEE Approved Draft Standard for Test Methods and Preferred Values for Silicon PN-Junction Clamping Diodes," in IEEE PC62.59/D4, June 2019 , vol., no., pp.1-40, 3 Sept. 2019.
- [2] Y. Kang and K. Niu, "The construction of tanner graph for iterative PN sequence acquisition," IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009), Shanghai, China, 2009, pp. 718-721.
- [3] Li Guolin, H. Min, B. Xiong and Z. Ying, "Application of Discrete Haar Wavelet Decomposition in Identification of PN Codes in PN Phase Modulated Signal," 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, China, 2007, pp. 4-634-4-637, doi: 10.1109/ICEMI.2007.4351223.