

# 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: GaN 耿氏二极管的初步设计

姓 名:

学 号:

学 院: 信电学院

专 业: 电子科学与技术

班 级: 电科 1803

指导老师: 余辉

2020 年 12 月 2 日

## 摘 要

太赫兹技术是被誉为未来重要的十大技术之一，有关太赫兹技术的研究是当今国际研究领域的前沿和热点。耿氏器件是太赫兹振荡源不可或缺的核心器件之一。本文旨在设计一个工作在太赫兹频段的工作频率高于 150GHz 的耿氏二极管。

总的来说，本文的设计重点及成果有如下几个方面：

(1) 比较了传统的耿氏二极管材料与 GaN 材料的特性，尽管传统的基于砷化镓 (GaAs) 耿氏二极管已经十分的成熟，但是其可以达到的工作频率有限，输出功率和转换效率低，而 GaN 材料具有大禁带宽度、高临界场强、高热导率、高载流子饱和速率等优点，可以大幅提高耿氏二极管的工作性能。

(2) 探索了 GaN 耿氏二极管的结构设计，在传统的  $n^+nn^+$  的结构上增加了 Notch 层，以减少“死区”对耿氏二极管性能的影响，促进偶极畴的形成，提升耿氏二极管的性能。

在本设计的最后，我们给出了一个带 Notch 层的工作频率在 400GHz 的 GaN 耿氏二极管。

关键字：耿氏二极管      氮化镓

# 目录

<b>1</b>	<b>设计背景</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>耿氏二极管的原理</b>	<b>4</b>
2.1	耿氏效应	4
2.2	原理性结构	8
<b>3</b>	<b>GaN 耿氏二极管设计</b>	<b>9</b>
3.1	GaN 材料优势	9
3.2	GaN 耿氏二极管参数设计	11
3.3	GaN 耿氏二极管结构设计	12
3.4	设计部分总结	13
<b>4</b>	<b>社会环境方面的考虑</b>	<b>13</b>
	<b>参考文献</b>	<b>15</b>

# 1 设计背景

近年来，随着太赫兹（THz）技术的迅速发展，太赫兹波在通信（宽带通信）、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像（无标记的基因检查、细胞水平的成像）、无损检测、安全检查（生化物的检查）等领域有了越来越广泛的应用。然而传统的基于光学方法所产生的太赫兹源大多为宽带脉冲辐射、成本高，因此从电子学方法产生高频大功率的太赫兹信号源逐渐成为人们研究的一个热点。

目前应用于太赫兹领域的半导体固态信号源以负阻器件为主，比如耿氏二极管（Gunn Diode）、共振隧穿二极管（RTD）、崩越二极管（IMPATT Diode）等。在这些二极管中，耿氏二极管具有工作频率高、稳定性强、可靠性高、噪声低、频带宽、电源电压低以及工作寿命长等诸多优点，因此在众多的转移电子器件中耿氏二极管具有在太赫兹频段应用的巨大潜力。

现要求设计一个能够工作频率在 150GHz 以上的耿氏二极管。

## 2 耿氏二极管的原理

### 2.1 耿氏效应

在 n 型 GaAs 样品的两端加上电场，当电场较小时，电流密度随着电场强度的增大而增大，当电场强度超过一定临界值后，如图 2.1(a) 所示电流密度反而开始减小，从宏观上看就好似表现出了电阻为负，这种效应叫做耿氏效应也叫做微分负阻效应，这种转移电子器件也叫作耿氏器件。

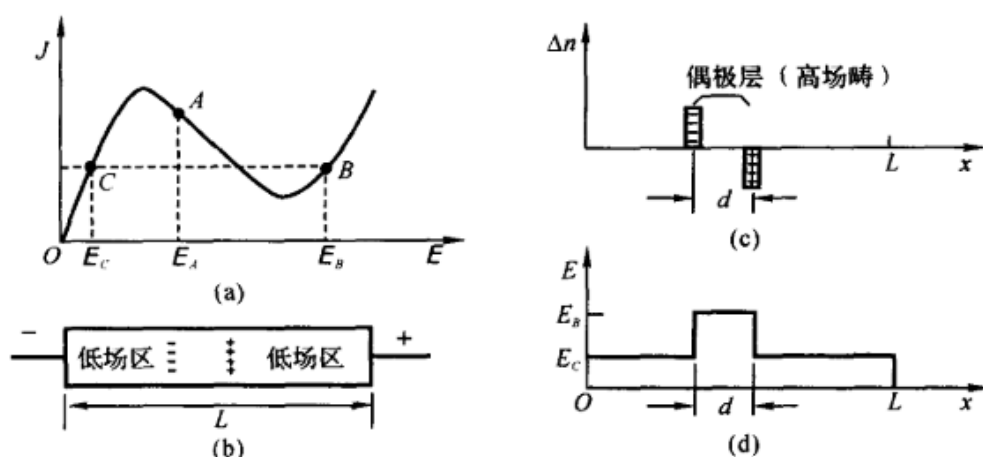


图 2.1: GaAs 耿氏效应 (a)  $J \sim E$  关系 (b) 偏置在  $E_A$  时形成的高场畴 (c) 电子浓度分布 (d) 偶极层中电场

从微观上来看耿氏二极管表现出的负阻特性的起因是速度电场的关系，电子在电

场中得到加速，但是当电场继续增大时，理论上电子的平均漂移速度  $v_d$  也应该继续增大，实际上却是在电场强度为  $3000\text{V/cm}$  时，达到最大值，如图 2.2 所示。随后，电场增加，电子的平均漂移速度减少，由  $v_d = \mu E$  可以得出电子迁移率下降，再由欧姆定律  $J = \sigma E = ne\mu E$  可以得出电导率下降，电流密度  $J$  下降，由此出现微分负电阻区。

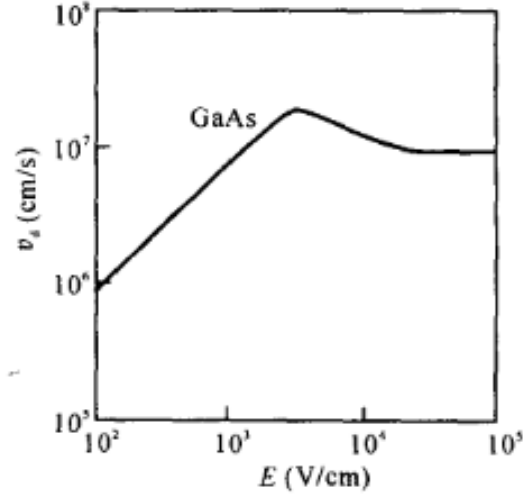


图 2.2: GaAs 中  $v_d \sim E$  关系

对负阻效应的进一步解释可以从 GaAs 的能带图出发。如图 2.3 所示，GaAs 导带具有双能谷，分别为中心谷（低能谷 1）和卫星谷（低能谷 2）。设  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为中心谷和卫星谷中的电子迁移率， $n_1$ 、 $n_2$  分别代表中心谷和卫星谷中的电子浓度，则导带电子浓度  $n = n_1 + n_2$ ，电流密度为：

$$J = n_1 e \mu_1 E + n_2 e \mu_2 E = (\sigma_1 + \sigma_2) E$$

在低场区（C 区）时，中心谷与卫星谷的能谷差为  $0.36\text{eV}$ ，远大于室温下的  $k_B T = 0.026\text{eV}$ ，激发到卫星谷的电子可以忽略， $n_1 \approx n$ ， $n_2 \approx 0$ ，此时满足欧姆定律；电场增加（后 C 区），中心谷中的部分电子获得了足够的跃迁能量，从中心谷跃迁（散射或输运）到比它能级更高的卫星谷中，但由于  $\mu_1$  远大于  $\mu_2$ ，此时电流密度随电场强度增加而平稳增加，但已偏离欧姆定律；电场继续增加（A 区），此时中心谷电子浓度大量降低，卫星谷电子浓度大量增加，电流密度减小，出现微分负电导区；电场继续增加（B 区），中心谷内的电子基本跃迁到卫星谷，即  $n_1 \approx 0$ ， $n_2 \approx n$ ，欧姆定律再次满足。

对耿氏效应区进一步探究。在靠近材料阳极的一端，由于电子还没有转移到卫星能谷，所以它的有效质量较小，在阳极区的电子迁移率就大，表现出电子被抽走的现象，在这一区域留下了正的电荷，形成正的电荷区域。而靠近阴极这部分区域，由于在这个区域载流子已经获得了足够能量，从而使得这里的电子开始从材料的主能谷向卫星能谷发生转移，因此这区域中的电子的有效质量大，导致其电子的迁移率变小，

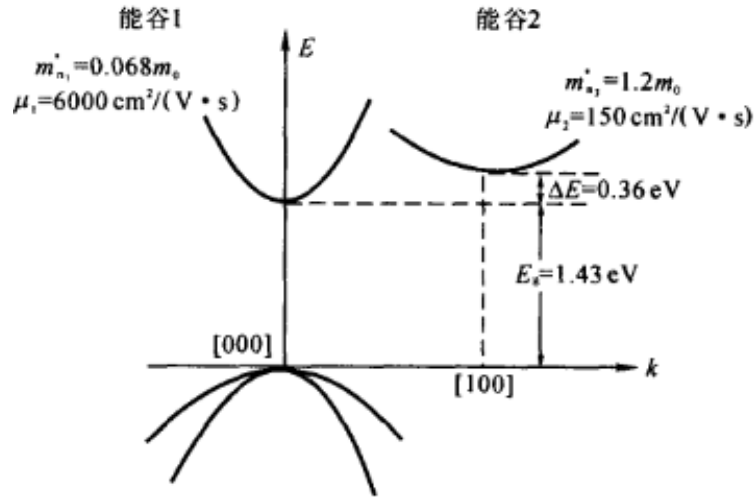


图 2.3: GaAs 的能带结构

载流子的迁移速度降低，在这一区域，表现出电荷的积累，形成一个负的电荷区域，如图 2.1(b) 所示。这两个电荷区域就构成了一边正电荷一边负电荷的空间，通常称这样一个空间为一个畴，即偶极畴。

由于畴的形成，使得畴中的电场比其畴区域外器件的其他地方的电场要大，如图 2.1(d) 所示，所以增大的畴内的电场会进一步使得畴中的低能谷即中心能谷中的电子向卫星能谷进行转移。在这个过程中，随着电子的转移，畴内的电场会进一步的增加，而畴外的电场则会进一步降低，使得畴内的电子会继续发生谷间转移，如此循环，直到畴内的中心能谷的电子全部转移到了卫星能谷中为止。这一个过程即是偶极畴不断长的过程，也是它同时以电子的漂移速度向阳极运动的过程，同时，空间电荷的非均匀性或指数增加，如图 2.4 所示。畴的长大在畴内中心能谷电子全部转移到卫星能谷后便停止，即畴最后会稳定下来。这时偶极畴便达到了饱和状态，它会以电子的饱和迁移速率向阳极运动。当整个畴到达阳极后，畴的正电部分区域首先被阳极吸收而消失，这个过程伴随着畴内的空间电荷的减少，继而畴内电场减少，相应的畴外的区域的电场增加的过程。

同时，这个过程还伴随着电流上升的过程，也即畴被吸收的过程就是耿氏二极管两端电流出现高频脉冲的过程。由于在畴还没被完全吸收时间段内，即在畴没完全消失的时间段内，器件中没有那一个区域或部分的电场比畴内的电场要大，所以，在器件中不可能同时会再次形成另外一个偶极畴，也即器件中不可能同时有两个偶极畴同时出现。只有在这个畴到达器件一端时下一个畴才开始产生。如此循环，即周而复始的出现畴的建立、移动和消失的过程，形成畴的周期型消失和产生，器件两端也会形成周期性的很窄的电流，如图 2.5 表现出一个稳定的高频频率脉冲，从而达到把直流信号转化为微波高频信号的目的。

我们把畴区消失与形成的时间  $\Delta t_1$  称为脉冲宽度，把畴区漂移时间（渡越时间）

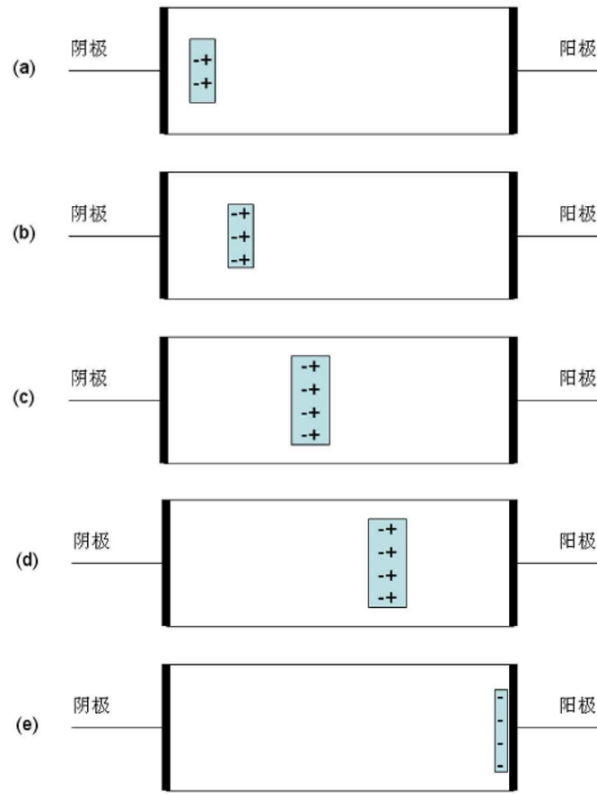


图 2.4: 偶极畴的运动过程 (a) 畴在阴极附近形成 (b) 畴一边漂移一边生长 (c) 畴完全形成并以畴外电子的平均漂移速度运动 (d) 稳定的畴继续像阳极渡越 (e) 畴到达阳极并被阳极吸收而消失

$\Delta t_2$  称为脉冲周期，由此可以得到振荡频率：

$$f = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{v_s}{L - d} \approx \frac{v_d}{L}$$

其中  $v_d$  为电子漂移速度， $L$  为二极管有源区的长度。

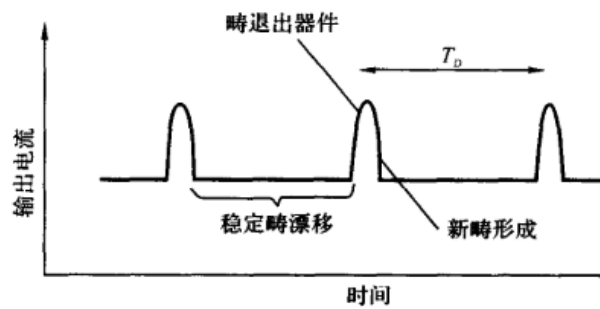


图 2.5: GaAs 耿氏器件中振荡电流

## 2.2 原理性结构

耿氏二极管要应用于电路，需要外加电极。但是电极不是如图 2.6 所示简单地与管芯区相连。

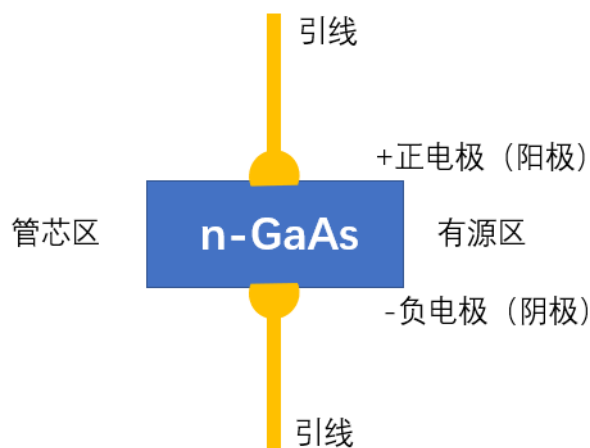


图 2.6: 无过渡区的 GaAs 耿氏二极管结构

当电极的金属与管芯区直接接触时，会在接触界面形成肖特基接触，这是一种整流接触，具有与二极管类似的单向导通特性。为了减少引线与管芯区之间的整流特性与接触电阻，实际设计中，我们会在管芯区与电极之间增加重掺杂的过渡区，实现半导体材料与金属的欧姆接触。如图 2.7 所示。

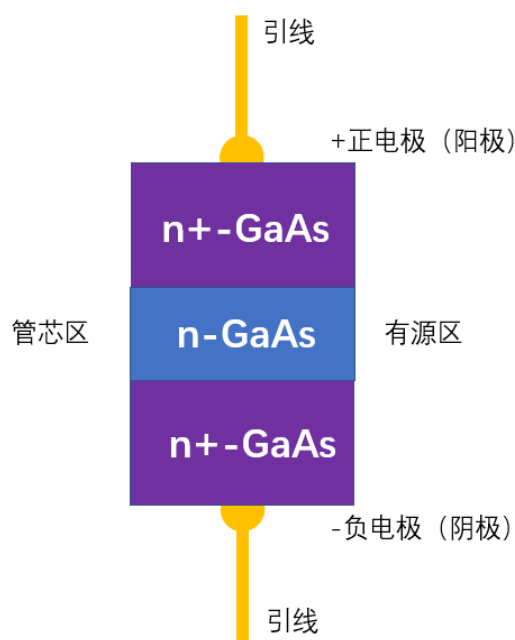


图 2.7: 有过渡区的 GaAs 耿氏二极管结构

当电压施加在耿氏二极管的两端时，重掺杂区  $n^+$  的载流子浓度高、电阻小，电



压主要降落在轻掺杂薄层  $n$ ，电梯度大，产生很高的电场值。作为过渡区的 2 层重掺杂  $n^+$  的引入，对有源区电场的影响很小。

耿氏二极管的等效电路如图 2.8 所示，金属材料可以用电阻表示，绝缘体可以用电容表示，半导体材料介于两者之间，因此可以用电阻和电容并联表示。有源区中畴区存在负阻效应，因此可以用一个负的电阻与电容并联表示，畴区之外可以用正的电阻与电容并联表示。

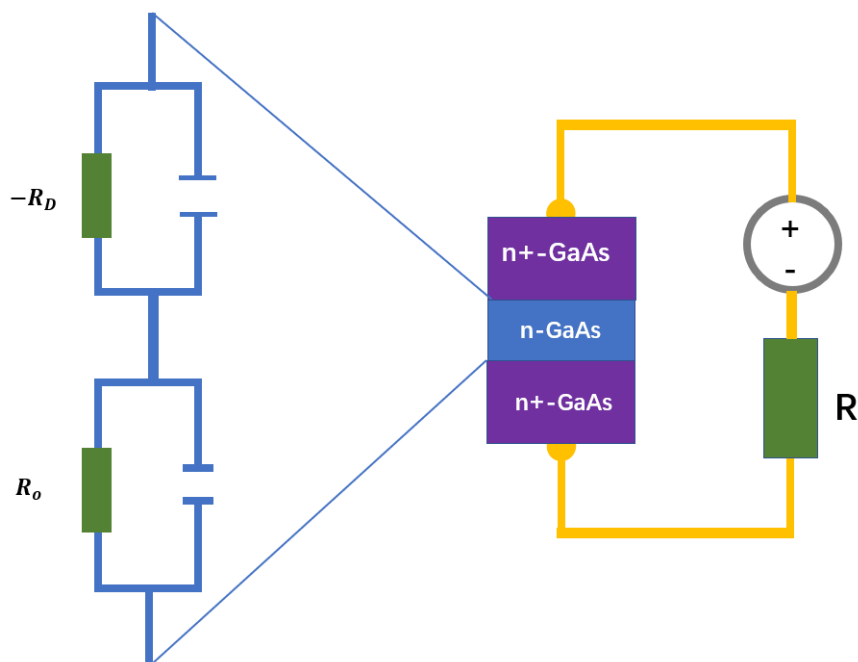


图 2.8: GaAs 耿氏二极管的等效电路

### 3 GaN 耿氏二极管设计

#### 3.1 GaN 材料优势

在设计中我们选取了 GaN 材料，其能带结构如图 3.9 所示，GaN 也是一种双能谷材料。

传统的耿氏二极管多以 GaAs 材料为主，技术成熟、可靠性高。但是在以高频大功率为需求的太赫兹应用中，这些器件过低的输出功率，大大的限制了它们的应用。对 GaN 材料的蒙特卡罗模拟结果显示，GaN 材料的负阻振荡频率可达 750GHz，远远大于 GaAs 材料的 140GHz，而更为重要的是，在太赫兹工作频段，GaN 基器件的输出功率比 GaAs 高一到两个数量级，可以达到几百毫瓦甚至几瓦的功率。图 3.10 给出了几种重要半导体材料的基本参数：

从图中可以看出 GaN 材料参数具有明显的优点：

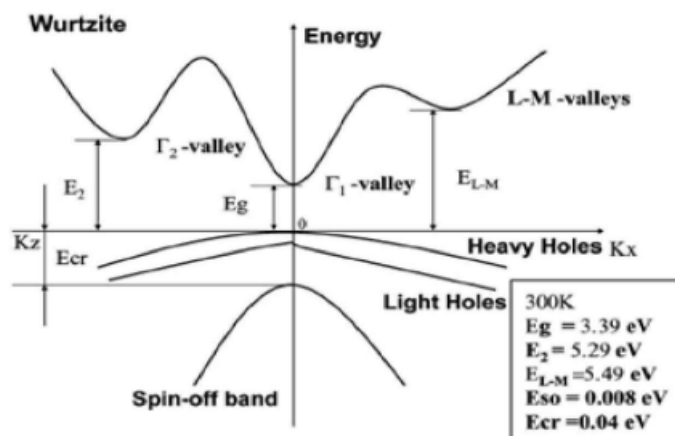


图 3.9: 纤维锌矿 GaN 能带结构

半导体材料	带隙类型	禁带宽度(eV)	熔点( $^{\circ}\text{C}$ )	热导率(W/Kcm)	电子迁移率( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	击穿电场(V/cm)	介电常数	饱和速度( $\text{cm/s}$ )
Si	间接	1.12	1420	1.4	1350	$6.0 \times 10^5$	11.9	$1.0 \times 10^7$
GaAs	直接	1.43	1238	0.54	6000	$6.5 \times 10^5$	13.2	$2.0 \times 10^7$
SiC	间接	3.2	2830	4.9	800	$3.5 \times 10^6$	9.7	$2.0 \times 10^7$
ZnSe	直接	2.58	1500	-	100	-	8.1	-
GaN	直接	3.42	1700	1.5	900	$5.0 \times 10^6$	8.9	$2.5 \times 10^7$

图 3.10: 几种重要半导体的参数

(1) 禁带宽度最宽，GaN 的禁带宽度为  $3.42\text{eV}$ ，利用 GaN 的大禁带宽度可制备抗辐射能力强的器件，适合于在空间科学和技术中应用；

(2) 载流子饱和速度高：用饱和漂移速度高的材料制作的器件，可在功率特性不变的情况下使频率特性得以改善；

(3) 与当前工艺技术的兼容性好：GaN 半导体材料可以利用当前硅衬底外延工艺实现异质外延，允许片内集成，成本低、性能好；

(4) 临界击穿场强高：耐压能力强，在耐压额定值相同时，器件的漂移区或基区允许尺寸小，因此导通电阻小，可以通过的电流大；

(5) 高热导率：热导率高，散热好，允许的芯片面积小，输出功率高，可提高电路集成度；

(6) 介电常数小：因此掺杂浓度和外加电压一样的条件下，GaN 器件存在的 pn 结电容较小，可工作在高频。

综合 GaN 材料的种种优点，在 GaN 材料与传统材料之间，我们选择了 GaN 作为本次设计工作在太赫兹频段的耿氏二极管的材料。

### 3.2 GaN 耿氏二极管参数设计

GaN 耿氏二极管速场关系图 3.11 所示，在 300K 情况下，GaN 的阈值电场为  $200kV/cm$ ，载流子峰值漂移速度为  $2.5 \times 10^7 cm/s$ ，载流子平均漂移速度为  $1.9 \times 10^7 cm/s$ 。

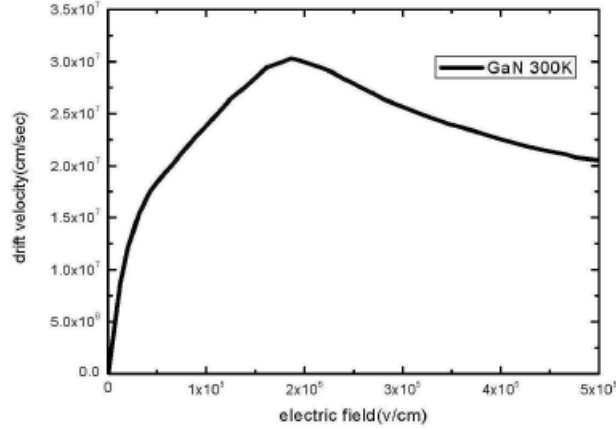


图 3.11: GaN 耿氏二极管速场关系图

根据速场关系图，我们选定耿氏二极管的工作电场  $E$ :

$$E = 300kV/cm$$

确定载流子饱和速度  $v_d$ ，近似作为畴区移动速度  $v_s$ :

$$v_d = 2 \times 10^7 cm/s$$

由于器件的渡越时间必须大于介电弛豫时间，可以得到：

$$Ln > \frac{3\epsilon v_s}{e\mu_{NDR}}$$

这是渡越区掺杂浓度和长度的下限。根据已经发表的论文，可以得到针对 GaN 材料的数值范围为： $Ln > 5.3 \sim 8.2 \times 10^{12} cm^{-2}$ 。

由振荡频率计算公式：

$$f = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{v_s}{L - d} \approx \frac{v_d}{L}$$

$1\mu m$  的渡越区长度可以产生约 200GHz 的频率，减小  $L$  可以提高频率，但是掺杂浓度因此也要提高。查阅资料得知，掺杂浓度过高时，畴会静止。针对 GaN 材料掺杂浓度的上限约为  $2.8 \sim 4.3 \times 10^{18} cm^{-3}$ 。

设计要求耿氏二极管工作频率大于 150GHz, 在这里我们选定工作频率为 400GHz, 根据振荡频率计算公式可以得到, 有源区厚度  $L$ :

$$L = 0.5\mu m$$

掺杂浓度  $n$ :

$$n = 1.5 \times 10^{17} cm^{-3}$$

经检验, 该掺杂浓度符合上述两个限制条件。

根据工作电场和有源区厚度  $L$ , 可以近似确定工作电压  $V$ :

$$V \approx \frac{E}{L} = \frac{300kV/cm}{0.5\mu m} = 60V$$

至此, 我们给出耿氏二极管的参数如下表所示:

表 3.1: 耿氏二极管参数

工作电场 $E$	饱和速度 $v_d$	振荡频率 $f$	有源区长度 $L$	掺杂浓度 $n$	电压 $V$
$300kV/cm$	$2 \times 10^7 cm/s$	$400GHz$	$0.5\mu m$	$1.5 \times 10^{17} cm^{-3}$	$60V$

### 3.3 GaN 耿氏二极管结构设计

在耿氏二极管结构设计中, 我们并不采用传统的  $n_+nn_+$  结构, 而是选择了带 Notch 层的设计, 如图 3.12 所示:

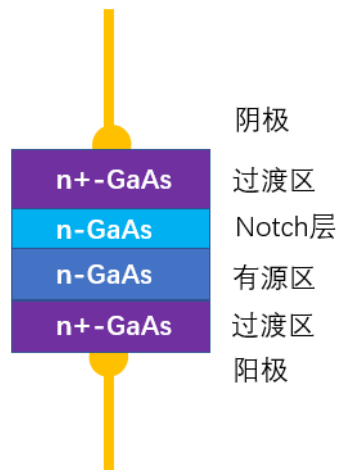


图 3.12: 带 Notch 层的 GaN 耿氏二极管结构图

耿氏二极管实际工作时, 微分负阻并不是立即出现的, 这主要是由于低能谷的电子必须从外部获得一定的能量, 才能跃迁至高能谷, 而且这种转移只有大规模的出现

时,才会有微分负阻出现。所以电子的转移需要一段预热时间,这导致畴的生长并不是发生在阴极处而是距离阴极一段距离处,称这段距离为“死区长度”。死区长度的出现使器件有效长度变短,从而降低器件的最高频率。为了解决这一问题,在器件结构设计中我们首先采用了在阴极欧姆接触与渡越区之间加一层较薄的低掺杂的同质 GaN Notch 层。当在阴极处加了低掺杂 GaN 层时,靠近阴极欧姆接触的低掺杂 GaN 层可以使有源区中的电场分布更加平缓,降低均匀掺杂电子渡越区中的电场峰值,阴极处的电子可以得到加速,获得能量,很快发生谷间转移,缩短电子预热时间。

通过查阅资料,可以得到 Notch 层和过渡区层的主要参数,由此得到 GaN 耿氏二极管的各层参数:

表 3.2: 耿氏二极管参数列表

器件各主要部分结构名称	具体数值
Notch 层掺杂浓度	$5 \times 10^{16} cm^{-3}$
Notch 层长度	$0.2 \mu m$
有源区掺杂浓度	$1.5 \times 10^{17} cm^{-3}$
有源区长度	$0.5 \mu m$
过渡区掺杂浓度	$2.5 \times 10^{18} cm^{-3}$
过渡区长度	$0.5 \mu m$

### 3.4 设计部分总结

由设计要求,耿氏二极管工作频率需要在 150GHz 以上。我们在各种材料中选择了 GaN 材料,然后根据设计要求确定了耿氏二极管的工作电场、振荡频率、有源区长度等主要参数,最后我们从传统的三明治结构出发创造性地提出了带 Notch 层的 GaN 耿氏二极管结构,使得电子可以很快发生谷间转移,得到性能更好的耿氏二极管。最终的设计成果是一个带 Notch 层的工作频率在 400GHz 的 GaN 耿氏二极管。

## 4 社会环境方面的考虑

氮化镓相对砷化镓对人体的影响较小。传统的耿氏二极管多采用砷化镓材料,但其中的砷原子有毒性,在材料制备、器件加工过程中,可能会释放或分解出少许的 As,砷化镓遇 1000°C 高温时,可产生三氧化二砷气体,对人体造成一定的伤害,而氮化镓中的氮一般来说是无毒的。

虽然氮化镓比砷化镓安全，但是还是需要制订严格的规章制度、操作规范与事故处理预案，做好安全防护工作与安全教育，进行危害辨识、认知与预防的训练，确保操作人员的健康和安全。

此外，需要处理好半导体材料废弃物排污与环保工作，保证不对空气、水资源、土壤等产生影响，并且持续进行工业卫生监控。

## 参考文献

1. 张旭虎.GaN 耿氏二极管及振荡器设计. 西安电子科技大学硕士学位论文,2011,1:1-38
2. 李玉梅.GaN 基太赫兹耿氏二极管结构及工艺研究. 西安电子科技大学硕士学位论文,2018,4:1-25
3. 王中旭.GaN 微波及 THz 功率器件设计与工艺研究. 西安电子科技大学硕士学位论文,2010,1:1-47
4. 姚慧.THz 波段 GaN 耿氏二极管非线性模型及振荡器研究. 西安电子科技大学硕士学位论文,2014,3:1-48
5. 杨珊珊. 高频 InP 基耿氏二极管的工艺研究. 宁夏大学硕士学位论文,2014,4:1-33