



## 本科实验报告

### GaN 耿氏二极管的初步设计

课程名称: 信息电子物理学基础

学院: 信息与电子工程学院

专业: 电子科学与技术

姓名:

学号:

指导老师: 汪小知

2023 年 12 月 4 日

## 摘要

目前，第五代（5G）通信的在全球范围内开始商业应用，其速度可达 4G 的上百倍，但可能仍然无法满足十年后包括物联网（IoT）在内的新兴系统的需求，为了满足后 5G 和 6G 技术对通信系统的需求，作为频率更高的太赫兹（THz）波肩负着未来通信发展的重任。近年来，对于太赫兹辐射源的研究已经成为各国研究人员关注的重点，氮化镓（GaN）材料因其大禁带宽度、高迁移率等优点脱颖而出，以 GaN 材料为基础制造的太赫兹功率器件已经被广泛应用于毫米波雷达等军事领域。耿氏器件作为一种出色的基于负阻效应制作的固态振荡器，具有低能耗、频率高、低噪声、高可靠性等优点，在太赫兹领域显示出了巨大的应用前景。而氮化镓基高电子迁移率晶体管（GaN-HEMT）由于栅极可作为沟道中热电子注入区，减小并固定“死区”的长度，提高了器件的性能，近年来有越来越多的研究人员关注 HEMT 器件中的耿氏效应并希望以此制作太赫兹振荡源。

目前 GaAs 基、InP 基耿氏二极管已经相当成熟。尽管用这些材料制作的耿氏二极管可靠性很高，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。以 SiC、GaN 为代表的第三代宽禁带半导体材料由于具有大禁带宽度、高临界场强、高热导率、高载流子饱和速率等优良特性，因此在微波毫米波大功率电子器件领域受到了人们广泛的关注。

本文在器件材料和工艺的基础上，基于传统的耿氏二极管结构，给出了适用于 GaN 耿氏二极管设计的基本准则，并利用该准则设计了带 Notch 层的 GaN 耿氏二极管以及带加速层的 GaN 耿氏二极管；设计了一个振荡频率  $f$  为 400GHz 的耿氏二极管，给出了其掺杂浓度以及对应的器件结构，并给出了一个基本的用于 GaN 耿氏二极管的制造流程。

**关键词：**太赫兹 氮化镓 偶极畴 耿氏二极管

# 目 录

<b>一、设计背景</b>	<b>1</b>
<b>二、耿氏二极管的原理</b>	<b>2</b>
1. 耿氏效应 . . . . .	2
2. 原理性结构 . . . . .	8
<b>三、实验方案设计与实验参数计算</b>	<b>8</b>
1. 材料特性及优势 . . . . .	8
2. 氮化镓耿氏二极管最高工作频率计算 . . . . .	11
3. 氮化镓耿氏二极管最大输出功率计算 . . . . .	11
4. 氮化镓耿氏二极管掺杂浓度计算 . . . . .	12
5. 耿氏二极管的结构设计 . . . . .	13
(1) 传统 $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$ 结构设计 . . . . .	13
(2) 带 Notch 层的 $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$ 结构设计 . . . . .	14
(3) 通过加入 AlGaN 加速层的 $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$ 结构设计 . . . . .	15
6. 耿氏二极管的参数设计 . . . . .	15
7. 设计部分总结 . . . . .	17
<b>四、制造流程示意图</b>	<b>18</b>
<b>五、生产安全防护、社会与环境因素</b>	<b>22</b>
1. 镓对人体健康的影响 . . . . .	22
2. 安全防护 . . . . .	22
3. 社会与环境因素 . . . . .	23
<b>参考文献</b>	<b>24</b>

## 一、设计背景

目前首先应用于太赫兹领域的半导体功率电子器件以负阻器件为主，比如基于砷化镓和磷化铟材料的耿氏二极管、肖特基二极管和崩越二极管等，但是由它们构成的电路，经倍频后信号输出功率太低（几百微瓦、几毫瓦的量级）。以碳化硅 SiC 和氮化镓 GaN 材料为代表的第三代宽禁带半导体材料由于具有大禁带宽度、高临界场强、高热导率、高载流子饱和速率、高异质结界面二维电子气浓度等优良特性，因此在微波毫米波大功率电子器件领域受到了人们广泛的关注。而近几年来，随着太赫兹这一新兴科学技术领域的迅猛发展，氮化镓基转移电子器件在太赫兹频段的应用研究日益蓬勃，这是由于氮化镓材料比传统的化合物半导体砷化镓（GaAs）具有更高的工作频率和输出功率。对氮化镓材料的蒙特卡罗模拟研究显示，氮化镓材料的负阻振荡基频频率可达 750GHz，远远大于砷化镓材料的 140GHz，而更为重要的是，在太赫兹工作频段，氮化镓基器件的输出功率比砷化镓高一到两个数量级，可以达到几百毫瓦甚至几瓦的功率，这在太赫兹技术中是最令人感兴趣的器件指标。宽带隙氮化镓半导体材料技术的日益发展给了人们很大的鼓舞，希望将其高频大功率的特性应用于太赫兹领域，但以当前的技术水平，氮化镓材料的制备和缺陷的控制仍存在较大的问题，因此目前最接近实用的氮化镓基太赫兹功率电子器件应首推耿氏二极管器件。

耿氏二极管是一种利用耿氏效应工作的微波有源器件，其基于耿氏效应的负微分电阻效应（NDR），为微波振荡器提供了一个低成本，低噪声以及高功率的解决方案。过去这些器件主要用于微波测试仪器、汽车防撞系统、高速通信、生物监测、军用雷达等其他方面。

耿氏二极管和雪崩二极管常常作为高频微波信号发射源，但与雪崩二极管相比，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、成本低、体积小以及工作寿命长等优点。经过模拟可知，电子转移器件中的耿氏二极管具有在太赫兹波段工作的巨大潜力。耿氏二极管将是一种重要的便携式连续可调的成本较低的太赫兹发射源。由于其具有的许多优点，必定在毫米波和太赫兹领域中占有一席之地。

当前的耿氏二极管主要基于砷化镓和磷化铟这两种 III-V 族化合物半导体来制造。尽管这两种材料提供了很好的可靠性，但是它们在工作频率以及功率输出能力方面由于其材料特性而受到了很大的限制。氮化镓材料作为一种宽禁带半导体材料，其速场关系同样表现出负微分电阻特性。相比砷化镓和磷化铟，其相对较大的谷间能带差，以及更高的峰值速度和饱和速度等特性，使其具有更加优良的功率处理能力和更高的工作频率。因此氮化镓耿氏二极管作为太赫兹领域里的太赫兹产生源之一。由于其具有的许多优点，必定在太赫兹领域中占有一席之地。

目前，全世界有很多小组在从事氮化镓耿氏二极管方面的研究，对于氮化镓的理论研究表明，氮化镓材料在许多方面较传统的砷化镓和磷化铟材料都有很大的优势。但是由于氮化镓衬底材料的选择、刻蚀、缺陷的控制仍存在问题，所以最近十几年，对太赫兹领域的氮化镓材料及其耿氏器件结构的理论研究和模拟仿真比较多，而真正的实验非常少。然而由于最近几年氮化镓材料的制备技术的提高，也开始了实际器件制造工艺的研究。但是目前国际上比较成熟的氮化镓耿氏二极管还没有制造出来。

## 二、耿氏二极管的原理

### 1. 耿氏效应

1963 年, 耿氏发现在如下图所示的 N 型砷化镓的两端电极上加以电压, 当半导体内的电场强度超过  $3 \times 10^3 \text{ V/cm}$  时, 半导体内的电流便以很高的频率振荡, 频率约为 0.47-6.5GHz, 这个效应称为耿氏效应。

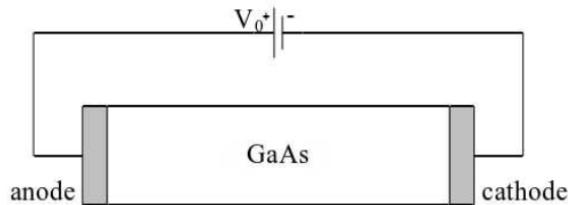


图 1: 耿氏二极管

耿氏效应描述了在同质体半导体材料中由于电子传输机制而产生的负微分电阻特性。能够产生耿氏效应的半导体材料都是拥有多于一个的导带能谷的直接带隙半导体, 并且在这些不同的能谷内, 其电子的密度和有效质量不同。一个典型的具有耿氏效应的体半导体材料的速场关系如图 2 所示, 从图中看出, 在电场较小的情况下, 电流密度  $J$  和电场强度  $E$  的关系满足欧姆定律, 载流子迁移率  $\mu$  与  $E$  无关。但当  $E$  的大小增加到  $10^3 \text{ V/cm} - 10^5 \text{ V/cm}$  时, 理论和实验都证实,  $J$  和  $E$  不再满足欧姆定律, 不是正比关系。如图二所示,  $\mu$  与  $E$  相关, 平均漂移速度  $v_d$  将达到饱和值。这种现象称为强场效应。对 n 型 GaAs, 若在其两端加上电场超过  $3 \times 10^3 \text{ V/cm}$  时,  $v_d$  与电场的关系曲线将出现微分负电阻区, 产生很高频率的电流震荡。这种频率属于微波范围, 这种现象称为耿氏效应。

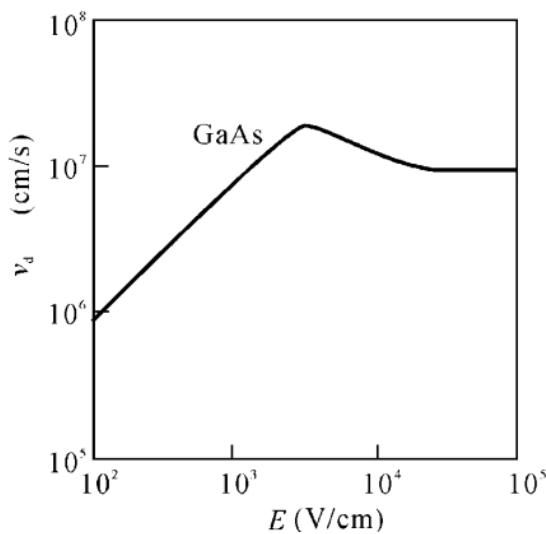


图 2: 电子转移器件的一般速场关系图

从图 3 (a) 中可以看出,  $J$  与电场  $E$  存在明显的负阻区, (b) 是外加偏置电场的两端器件。若在阴极附近, 出现电子浓度一个涨落, 于是形成图 (c) 所示偶极层, 称为高场畴。其形成的具体原因为, 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。而靠近阴极这部分的区域, 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, 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。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。它所形成的场与外场方向相同。层内相对于层外, 电场增强, 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生长的过程, 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。高场畴稳定情况下, 器件内的电场如图 (d) 所示。畴内电子将以同一漂移速度  $v_s$  向阳极移动, 到达阳极并从阳极“退出”, 从而可以得到输出电流。同时, 半导体内又处于外偏电场  $E_A$ , 在阴极端附近新生长出一个高场畴并向阳极移动, 又可输出电流脉冲, 其情形如图 4 所示。

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)  $\Delta t_2$  称为脉冲周期, 由此可以得到振荡频率:

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

其中  $v_d$  为电子漂移速度,  $L$  为二极管有源区的长度。

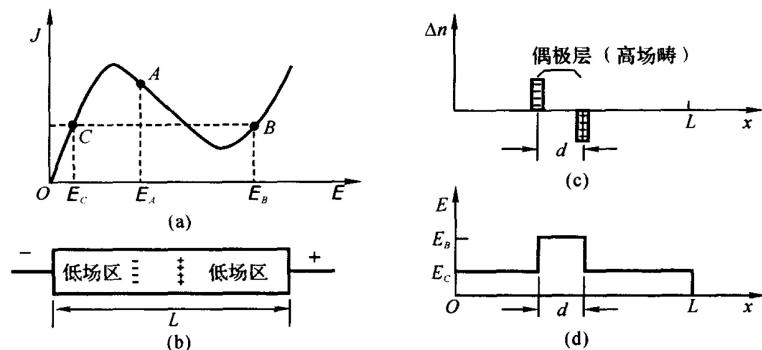


图 3: GaAs 耿氏效应 (a)  $J$  与  $E$  关系 (b) 偏置再  $E_A$  时形成的高场畴 (c) 电子浓度分布 (d) 偶极层中电场

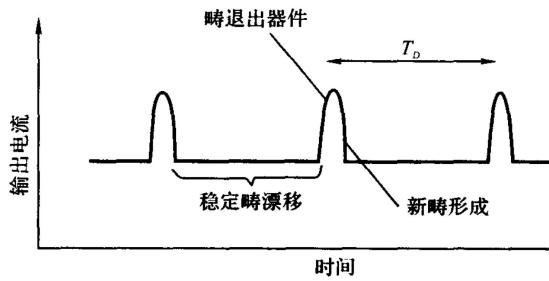


图 4: GaAs 耿氏器件中震荡电流

一般畴易在高阻区，所以这种器件的阴极端设计成高阻。稳定畴的形成和移动，产生输出电流，对器件的长度  $L$  和载流子浓度  $n_0$  有一定限制，因为器件的渡越时间必须大于介电弛豫时间，即：

$$\frac{L}{v_s} > \tau_d = \frac{\epsilon_S}{\sigma} = \frac{\epsilon_S}{e |\mu^*| n_0} \quad (2)$$

此式可写成  $L n_0 > \frac{\epsilon_S}{e |\mu^*|}$ ，一般对 n 型 GaAs 可取  $|\epsilon_S|=100\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $v_s = 10^7\text{cm/s}$ ，则  $L n_0 > 10^{12}\text{cm}^{-2}$ ，所以对渡越时间工作方式的耿氏器件需要满足的一般条件为：

$$10^{12}\text{cm}^{-2} < L n_0 < 10^{14}\text{cm}^{-2} \quad (3)$$

耿氏效应的产生同强电场作用下半导体导带能谷之间的电子转移有关。如图 5 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  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为中心谷和卫星谷中的电子迁移率， $n_1$  和  $n_2$  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：

$$J = n_1 e \mu_1 E + n_2 e \mu_2 E = (\sigma_1 + \sigma_2) E \quad (4)$$

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。进入能谷 2 的电子，有效质量增大，迁移率降低，结果  $v_d$  减小，也即电流密度 J 减小，因此产生负阻效应。以较低迁移率慢运动的电子在样品阴极端附近积累，从而产生带正负电荷的偶极层，其附加电场与外电场  $E_A$  方向一致。电场增强引起电子进一步积累，电场进一步增强。而畴外电场则不断下降，直到高场和低场值进入正阻区，畴区中电荷和电场不再增加，形成稳定分布。在场作用下，高场畴作为一个整体向阳极运动，产生耿氏震荡电流如图 4 所示。

对耿氏效应区作进一步详细分析，即在靠近材料阳极的一端，由于电子还没有转移到了卫星能谷，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

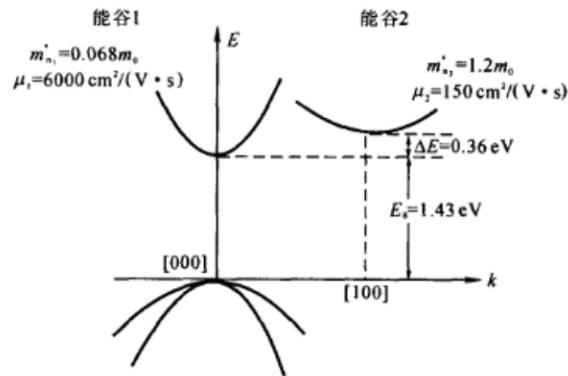


图 5: GaAs 的能带结构

现象, 在这一区域留下了正的电荷, 形成正的电荷区域。而靠近阴极这部分的区域, 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, 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。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, 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。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, 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。

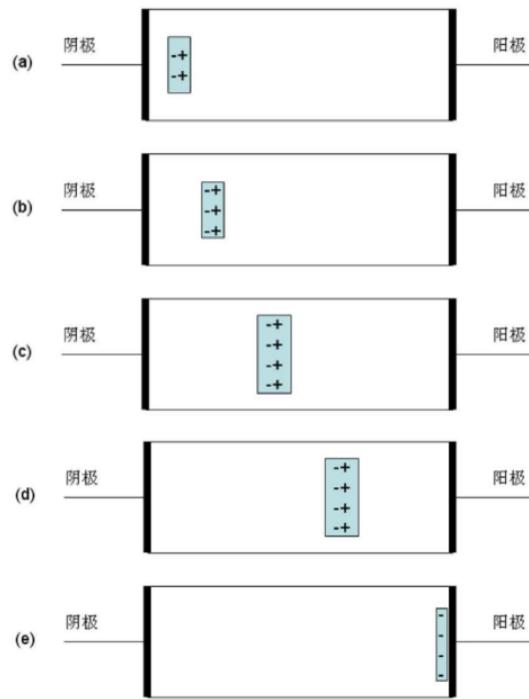


图 6: 偶极畴的运动过程 (a) 畴在阴极附近形成 (b) 畴一边漂移一边生长 (c) 畴完全形成并以畴外电子的平均漂移速度运动 (d) 稳定的畴继续像阳极渡越 (e) 畴到达阳极并被阳极吸收而消失

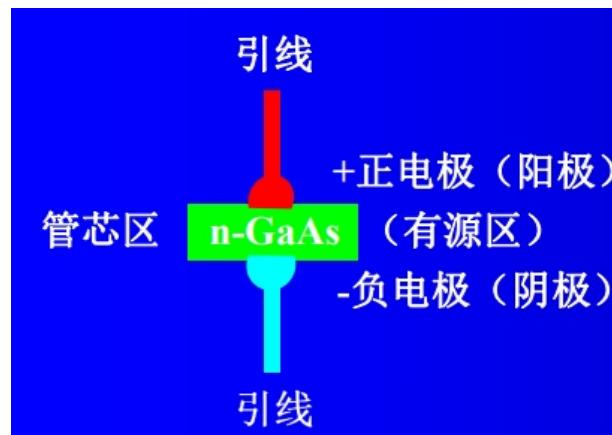


图 7: 无过渡区的 GaAs 耿氏二极管结构

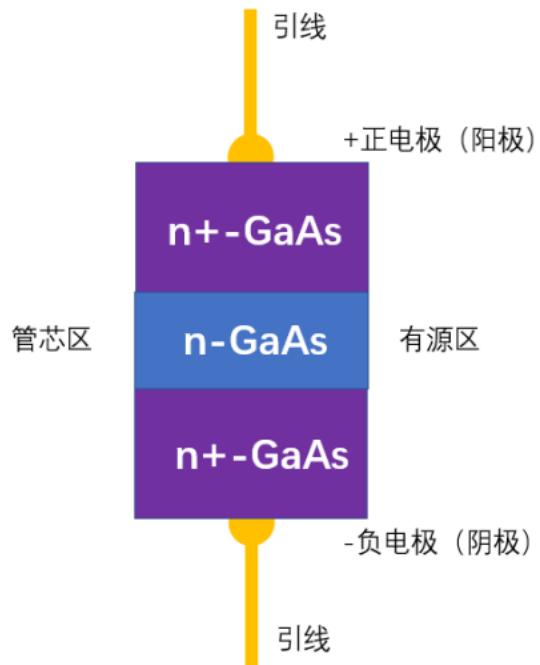


图 8: 有过渡区的 GaAs 耿氏二极管结构

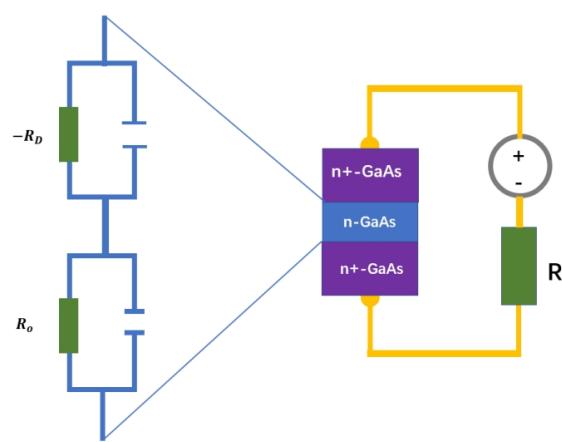


图 9: GaAs 耿氏二极管的等效电路

## 2. 原理性结构

由于耿氏二极管最终需要应用于电路，因此需要外加电极。一个基本的耿氏二极管（以 GaAs 为例）结构如图 7 所示。

但是电极简单地与管芯区相连会出现一系列问题。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 8 所示。

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 9 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。

## 三、实验方案设计与实验参数计算

### 1. 材料特性及优势

对于半导体行业的发展，到目前为止一般分为三代电子材料：第一代电子材料为 Si 和 Ge，第二代电子材料为 GaAs、InP、GaP、InAs、AlAa 及其合金，第三代电子材料则是近几年来得到快速发展的宽禁带材料 ( $E_g > 2.3\text{eV}$ )，如 SiC、ZnSe、金刚石和 GaN 等。而与前两代电子材料相比，第三代半导体材料具有更大的禁带宽度、较小的介电常数、较高的电子饱和速度与良好的导热性等许多的优良特性，因此，使用其制作抗辐射、高频和大功率电子器件非常合适。

在很长的时期内，第三代电子材料中的 SiC 和 ZnSe 一直是被国内外研究和开发的重要材料。而且在这期间 GaN 材料由于其位错密度较大、 $n^-$  型本底浓度较高、找不到合适的衬底材料等一系列的问题而被忽略，导致 GaN 材料出现发展非常慢的时期。但是自从 90 年代以来，由于材料与器件技术水平的发展与改进，GaN 器件得到了迅速发展，目前已经成为宽禁带半导体材料中最有发展潜力与应用前景的一种材料。

GaN 材料大致分为两种结构，闪锌矿结构和纤锌矿结构，还有一种叫做岩盐矿结构，但并不常见，这三种结构分别如图 10 所示。闪锌矿结构 GaN 一般情况下是一种亚稳态结构，纤锌矿结构则较为稳定，现在所见到的 GaN 大部分是纤锌矿结构，并且现主要的研究对象也是纤锌矿结构 GaN。

如图 11 所示，为 GaN 纤锌矿结构晶体的能带结构图：

由图 11 中的能带图可以看出，此结构 GaN 的价带极大值处于  $K=0$  处，导带中有一个高能谷和一个低能谷，且具有较宽的禁带宽度，其值为  $3.3\text{eV}$ ，GaN 能表现出和 GaAs

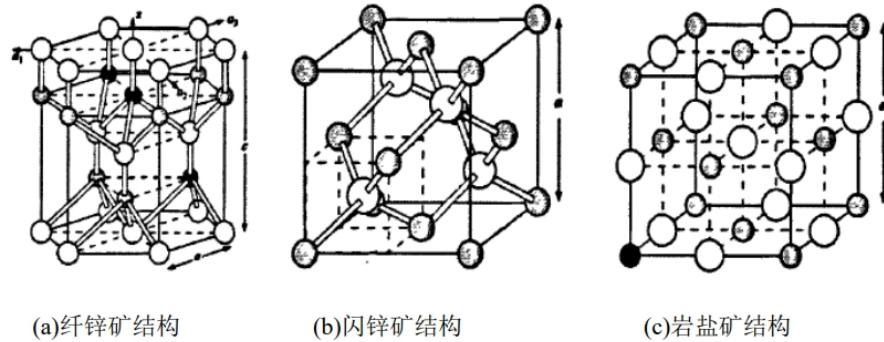


图 10: GaN 晶体结构

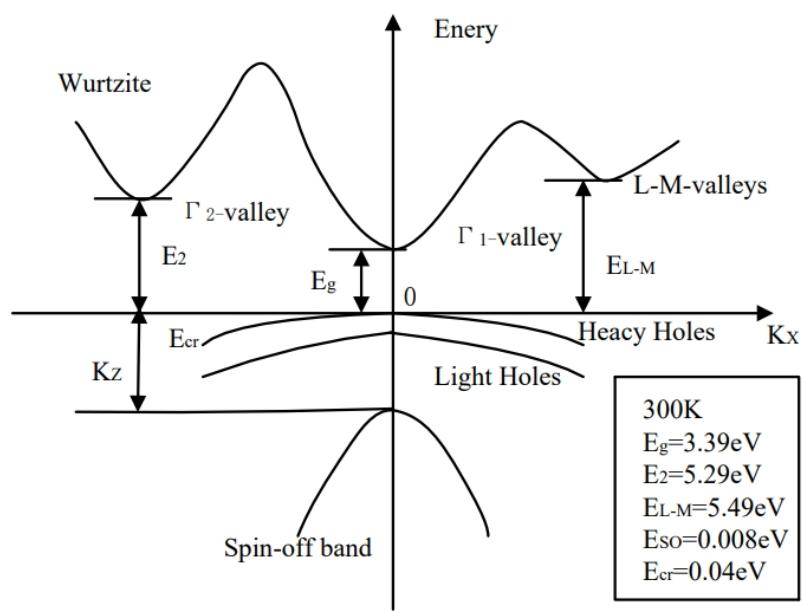


图 11: GaN 纤锌矿结构能带图

同样的负微分电阻特性正是因为这两个能谷的作用。通过对 GaN 材料进行蒙卡模拟，前人得到其速场关系如图 12 所示：

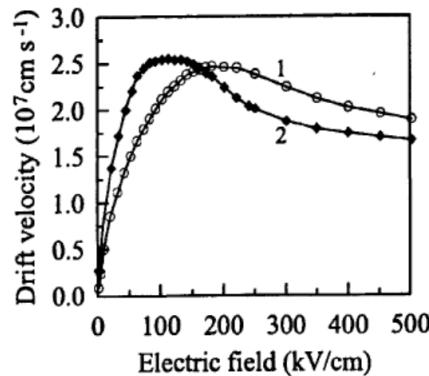


图 12: Kolink 的全带 Monte Carlo 模拟 GaN 速场关系曲线图

从图中我们可以看出，GaN 材料也具有与 GaAs 类似的负微分迁移率特性，这个特性使其有一个重要的应用就是制作负阻振荡器并将其用于产生高频振荡。

氮化镓材料具有许多优良的电学特性，比如禁带宽度宽、击穿场强大、耐腐蚀性强、抗辐射性强、热导率高等特点，另外氮化镓材料还非常稳定，而且其熔点十分高，能达到  $1700^{\circ}\text{C}$  左右，其电离度在其同族半导体化合物材料中也是最高的，在 300K 时，氮化镓是不能溶于水、酸和碱的，而却能溶于热的碱溶液。

从图 13 可以看出，氮化镓材料与 Si, GaAs, SiC, ZnSe 等材料的相应特性相比，其具有最大的禁带宽度和饱和速度，并且有很大的击穿电场和较高的热导率。

半导体材料	带隙类型	禁带宽度(eV)	熔点(°C)	热导率(W/Kcm)	电子迁移率(cm <sup>2</sup> /Vs)	击穿电场(V/cm)	介电常数	饱和速度(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 13: 几种重要的半导体材料的基本特性对比

由于 GaN 材料的宽带隙，其在高频功率器件方面的应用具有非常大的优势，这种器件适合于在高频率、高温度、强烈辐照等恶劣环境下工作，并且具有极好的微波功率特性。

## 2. 氮化镓耿氏二极管最高工作频率计算

在耿氏效应中, 材料中的载流子必须积累到一定的能量, 才能从其主能谷跃迁到其卫星能谷中。如果是通过外加电场给载流子提供能量, 那么载流子就必须通过一定的时间加速来达到所需的能量。所以在以耿氏效应为工作原理的转移电子类器件中, 存在载流子在主能谷中积累能量所需的时间以及载流子向卫星能谷跃迁所需的时间。由于上面的原因, 所以以耿氏效应为机理的转移电子器件有一定的工作频率上限。

下面以畴的观点来分析这个问题。在畴的理论模型下认为, 一个畴从阴极开始形成, 到并在向阳极漂移的过程中, 一边生长, 一边漂移, 畴达到它稳定时所需时间即为最小的振荡周期。把畴的形成并稳定的这段时间称为畴的渡越时间或是畴的生长时间, 也称为负微分电阻弛豫时间  $\tau$ , 其中包括谷间能量弛豫时间  $\tau_{ER}$  和谷间传输散射弛豫时间  $\tau_{ET}$ :

$$\tau = \tau_{ER} + \tau_{ET} \quad (5)$$

则耿氏期间的最高频率  $f_m$  为:

$$f_m = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{ER} + \tau_{ET}} \quad (6)$$

能量弛豫指的是处于主能谷的载流子在外加电场的作用下通过加速获得动能的过程, 即为载流子加速的过程。获得的这个动能至少应该等于主能谷和卫星能谷能量值之差  $\Delta E$  能发生跃迁。因此能量弛豫时间  $\tau_{ER}$  可视为, 处于主能谷底部的载流子在外加电场作用下从静止态被加速, 到获得的动能等于卫星能谷底与中心能谷底的能量差  $\Delta E$  谷所需的时间, 即

$$\tau_{ER} = \frac{\sqrt{2m_{eff}\Delta E}}{qE_{th}} \quad (7)$$

其中  $m_{eff}$  为载流子的有效质量,  $E_{th}$  为载流子临界跃迁电场。通过上式可以计算出氮化镓材料中的能量弛豫时间为 0.15ps, 而砷化镓材料的能量弛豫时间为 1.5ps, 氮化镓的  $\tau_{ER}$  比砷化镓的  $\tau_{ER}$  小 10 倍左右。

谷间传输弛豫时间可以通过对氮化镓材料进行蒙特卡洛仿真得到, 现在得到的仿真值分别为氮化镓—1.2ps、砷化镓—7.7ps。从上面的计算中, 可以看出相对于砷化镓材料, 氮化镓在频率特性上的优势很大。氮化镓材料可以应用在需要更高的工作频率的场合。

## 3. 氮化镓耿氏二极管最大输出功率计算

氮化镓材料同时具有相对比较大的电子跃迁阈值电场 (250KV/cm) 和相对比较高击穿电场 (3MV/cm), 因此氮化镓耿氏器件可以在相对比较高的偏压下工作, 同样也可产生相对比较高的输出功率。氮化镓耿氏器件可望解决传统转移电子器件在功率输出偏低方面的问题, 其最大输出功率可作如下估算:

在关于畴渡越假设的模型下, 耿氏二极管器件有源区的长度  $L$  与器件振荡频率  $f$  的关系为:  $f = v_{sat}/L$ , 其中  $v_{sat}$  为电子饱和漂移速度。由于半导体材料上的外加电场不能无

限地增加, 必须小于其击穿电场  $E_B$ , 因此器件上的最大偏压  $V_D$  为:

$$V_D = \frac{E_B v_{sat}}{f} \quad (8)$$

当器件外接电路的阻抗为  $Z$  时, 则电路中的最大电流为:

$$I = \frac{V_D}{Z} = \frac{E_B v_{sat}}{Z f} \quad (9)$$

所以, 转移电子器件的最大输出功率可表示为:

$$P_m = V_D I = \frac{(E_B v_{sat})^2}{Z f^2} \quad (10)$$

即:

$$P_m f^2 Z = (E_B v_{sat})^2 \quad (11)$$

对于一种确定的半导体材料来说, 其  $E_B$  和  $v_{sat}$  都是常量, 所以由某一确定材料制造的器件在高频工作时的最大输出功率受上式限制。在转移电子器件中, 由于其偶极畴中的电场远高于其有源区中的平均电场, 为避免器件击穿损坏, 总偏压不宜过大, 这就大大限制了转移电子器件在畴渡越时间模式下的最大输出功率。由于氮化镓材料的禁带宽宽大, 临界击穿电场很高, 所以在由氮化镓材料制作的转移电子器件可以在很高的偏压下工作, 从而得到较高的输出功率。

#### 4. 氮化镓耿氏二极管掺杂浓度计算

对于耿氏器件而言, 在一定偏压下能否形成稳定的耿氏振荡, 主要取决于其掺杂浓度浓度  $N$  与其相应的转移电子器件有源区长度  $L$  的乘积值以及临界掺杂浓度  $N_{crit}$  两个方面。

在畴渡越模型下, 因为畴的生长需要时间, 在一定的掺杂浓度下, 一个稳定畴的形成就需要器件具有一个最小的有源区长度。氮化镓耿氏器件要形成稳定的耿氏振荡, 器件中畴的形成时间  $3\tau$  ( $\tau$  为介电弛豫时间) 就应当小于畴经过器件有源区的渡越时间, 由此可估算这个有源区的最小长度。具有微分负阻特性的半导体中畴的形成过程如下: 现在设定氮化镓耿氏器件的电阻为  $R$ , 电容为  $C$ , 则有

$$R = \rho \frac{L}{s} = \frac{L}{\sigma s} \quad (12)$$

$$C = \frac{\epsilon s}{L} \quad (13)$$

这里  $L$  是氮化镓转移电子器件的长度;  $s$  是其截面积, 由以上二式可得到介电弛豫时间  $\tau$  为:

$$\tau = RC = \frac{L}{\sigma s} \times \frac{\epsilon s}{L} = \frac{\epsilon}{q\mu_{ndr} N} \quad (14)$$

其中  $\mu_{ndr}$  称为负微分迁移率, 对于氮化镓材料, 它的值约为  $50\text{cm}^2/(\text{V.S})$ ; 而砷化镓为  $2500\text{cm}^2/(\text{V.S})$ 。

$\tau$  的大小表征了空间电荷生长的快慢, 而高场畴(偶极畴)实际形成的时间约为  $3\tau$ 。对于转移电子器件, 高场畴在体内渡越的时间一定要大于等于其形成的时间, 否则就不能形成稳定的耿氏振荡。即:

$$\frac{L}{v_{PEAK}} \geq \frac{3\varepsilon}{q\mu_{ndr}N} \quad (15)$$

$$(NL) \geq (NL)_0 \equiv \frac{3\varepsilon v_{PEAK}}{q\mu_{ndr}} \quad (16)$$

其中  $(NL)_0$  是形成耿氏振荡的  $(NL)$  临界值。

另外, 耿氏二极管(转移电子器件)在畴渡越时间模式下产生的振荡频率  $f$  约为:

$$f = \frac{v_{sat}}{L} \quad (17)$$

要想得到更高的频率就要减小  $L$ , 因为有标准  $(NL)_0$  的限制,  $L$  减小,  $N$  必然增大, 当  $N$  超过临界掺杂浓度  $N_{crit}$  时, 就会在有源区阳极附近形成静止畴, 寄生静止畴的产生将会导致器件输出功率下降和期间过早地被击穿。为了避免形成静止畴, 半导体材料的掺杂浓度应小于临界掺杂浓度  $N_{crit}$ , 其计算公式为:

$$N_{crit} = \frac{\varepsilon \times E_{TH}}{q} \quad (18)$$

## 5. 耿氏二极管的结构设计

### (1) 传统 $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$ 结构设计

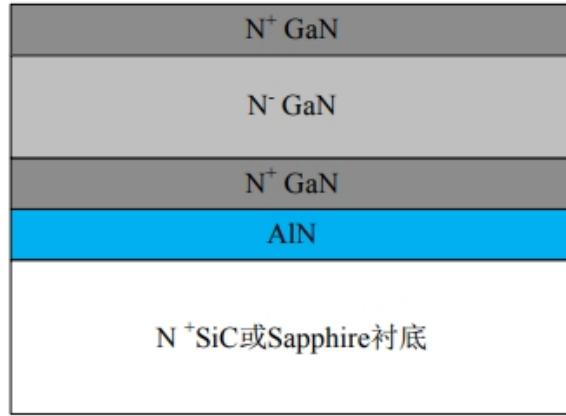


图 14: 传统  $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$  耿氏二极管

该结构一共由 5 层构成, 分别为:  $N^+SiC$  或 sapphire 衬底, 主要起到器件的支撑作用, 为器件提供一个支撑载体。AlN 缓冲层, 用于缓冲 GaN 与  $N^+SiC$  或 sapphire 衬底之间的晶格失配。 $N^+GaN$  接触层, 主要用于提供一个很好的欧姆接触, 减小器件的接触电阻。 $N^-GaN$  载流子渡越层(有源区), 为耿氏器件的有源区, 该结构的设计主要是关于

该区域的浓度和尺寸的设计。 $N^+GaN$  接触层, 用于提供一个很好的欧姆接触, 减小器件的接触电阻。为了计算方便, 我们在下图给出氮化镓和砷化镓的基本材料性质。

材料	$E_{th}$ (KV/cm)	$V_{sat}$ (cm/s)	$V_{peak}$ (cm/s)	$\mu$ (V/cm <sup>2</sup> s)	$\mu_{NDR}$ (V/cm <sup>2</sup> s)	$f_{NDR}$ (GHz)
氮化镓	150	$2 \times 10^7$	$2.5 \sim 3.0 \times 10^7$	280	50	750 4000(max)
砷化镓	3.5	$1 \times 10^7$	$1.5 \times 10^7$	8000	2500	100 600(max)

图 15: 氮化镓和砷化镓材料的基本材料参数

下面给出  $N^-GaN$  载流子传输层的设计方法:

- 公式  $NL > \frac{3\varepsilon v_{PEAK}}{q\mu_{ndr}}$  是渡越区参杂浓度和长度的下限, 这个下限包含了另一个表达式  $NL > \frac{3\varepsilon v_{sat}}{q\mu_{ndr}}$  的范围。经计算, 针对 GaN 材料的数值范围为:

$$NL > 5.3 \sim 8.2 \times 10^{12} cm^{-2} \quad (19)$$

取值范围是由于采用了不同参数所致。

- 公式  $N_{crit} < \frac{\varepsilon \times (E_{th})^2}{q}$ , 给出了为不想产生静态畴渡越区掺杂浓度的上限, 另一种估算公式为  $N_{crit} < \frac{\varepsilon (v_{sat})^2}{qD\mu_{NDR}}$ 。经计算, 针对氮化镓材料的数值范围为:

$$N_{crit} < 2.8 \sim 4.3 \times 10^{18} cm^{-3} \quad (20)$$

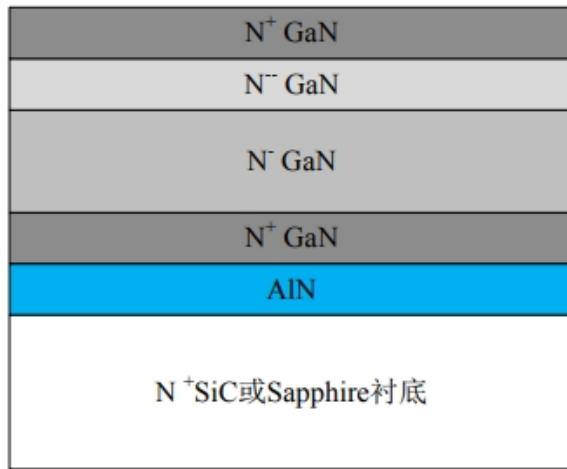
- 公式  $f_{NDR} = \frac{v_{sat}}{L}$  为耿氏二极管在渡越模式下的耿氏振荡频率, 显而易见, 1um 的渡越长度可以产生约为 200GHz 的频率; 若要提高频率, 则必须减小 L, 根据上面的公式, 则要提高掺杂浓度 N。

- 公式  $V_{bias} = \frac{Ev_{sat}}{f_{NDR}}$  为二级管两端的偏压, 由直流偏置和交流信号组成, 即  $V_{bias} = V_{DC} + V_{RF}$ , 公式  $I = V_{bias}/Z$  为流经二极管的电流, 其中 Z 为振荡电路的总阻抗, 因此最大的偏压和最大的电流分别为  $V_{max} = \frac{E_{BR}v_{sat}}{f_{NDR}}$  和  $I_{max} = \frac{V_{max}}{Z}$ ; 因此在在 200GHz-300GHz 的频率下可以达到  $10^5 w$ 。

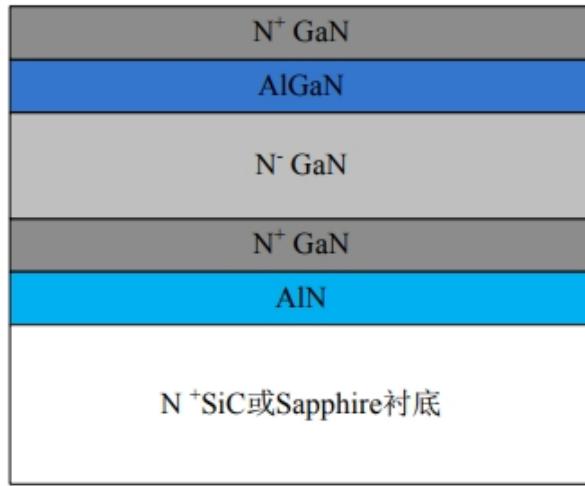
## (2) 带 Notch 层的 $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$ 结构设计

$N_-$  型 GaN Notch 层的设计:

GaN Notch 层能够促进偶极畴的形成, 减小“死区”长度, 因此可以减薄渡越层长度 L, 提高耿氏振荡频率。Notch 层的掺杂浓度一般为  $10^{16} cm^{-3}$  量级, 即可以采用低掺杂也可以采用非故意掺杂的背景载流子浓度来实现。

图 16: 带低掺杂 Notch 层的  $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$  耿氏二极管

(3) 通过加入 AlGaN 加速层的  $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$  结构设计

图 17: 带 AlGaN 加速层的  $N^+GaN/N^-GaN/N^+GaN$  耿氏二极管

该结构通过加入加速层来减小渡越层的长度 L, 来提高振荡频率。

## 6. 耿氏二极管的参数设计

GaN 耿氏二极管速场关系如图所示, 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  $1.9 \times 10^7 cm/s$ 。

我们选定耿氏二极管的工作电压 E 为:

$$E = 300kV/cm \quad (21)$$

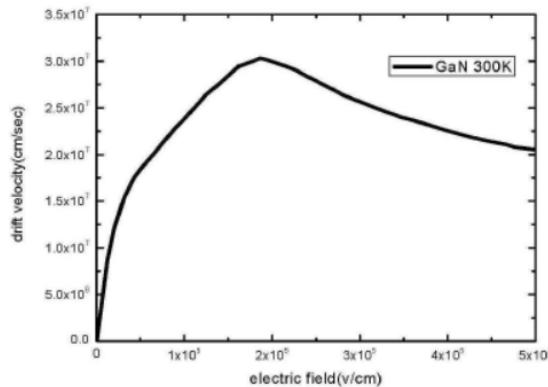


图 18: GaN 耿氏二极管速场关系图

确定载流子饱和速度  $v_d$ , 近似作为畴区移动速度  $v_s$ :

$$v_d = 2 \times 10^7 \text{ cm/s} \quad (22)$$

由于器件的渡越时间必须大于介电弛豫时间, 可以得到:

$$NL > \frac{3\varepsilon v_s}{e\mu_{NDR}} \quad (23)$$

据前文所计算:  $NL > 5.3 \sim 8.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

由振荡频率计算公式:

$$f = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{v_s}{L - d} \approx \frac{v_d}{L} \quad (24)$$

1μm 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  $2.8 \sim 4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

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  $L = 0.5 \mu\text{m}$ , 掺杂浓度  $n = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 经检验, 符合条件。

根据工作电场和有源区厚度 L, 可以近似确定工作电压 V:

$$V \approx E \times L = 300 \text{ kV/cm} \times 0.5 \mu\text{m} = 15 \text{ V} \quad (25)$$

因此, 耿氏二极管的参数如下表所示:

目前氮化镓基耿氏二极管基本采用两种电极结构, 即平面同轴电极结构和纵向上下电极结构, 其中对平面同轴电极结构的研究较为广泛, 这是由于该结构在材料制备和器件工艺上不很复杂, 兼容目前广泛采用的氮化镓器件平面工艺技术。然而, 这种同轴电极结构的耿氏二极管所面临的最大问题是在器件封装时必须在正面引出阴极和阳极, 因为器件了采用高阻性衬底。因此在高偏压下, 空间距离很接近的两电极间将产生极高的电场, 容易

表 1: 耿氏二极管的设计参数

工作电压 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	$2 \times 10^7 \text{ cm/s}$	400GHz	$0.5\mu\text{m}$	$1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	15V

出现电弧并产生击穿性漏电。而对于氮化镓耿氏器件而言，要产生耿氏负阻效应需要达到 200KV/cm 以上的临界电场强度，这就要求二极管两端的直流偏压很高，才能产生耿氏振荡，得到足够的输出功率。而上下电极结构中由于采用了衬底电极，这种纵向结构在空间上隔离了两电极，因此有效抑制了两电极间的电迁移造成的击穿现象，同时这种大面积的衬底电极结构也减小了二极管的寄生串联电阻，非常有利于器件的散热，这些优势，尤其太赫兹频段工作的器件而言，在振荡频率稳定性和输出功率特性方面显得异常重要。本文选择带 Notch 层的设计，如图所示：

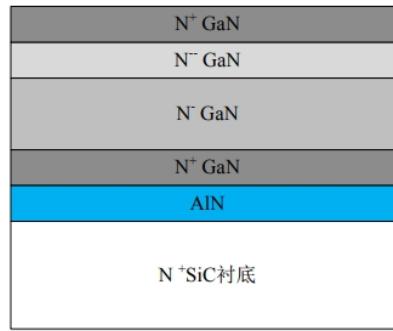


图 19: 带氮化镓 Notch 层的氮化镓耿氏二极管

其各层的具体尺寸和掺杂浓度为：

## 7. 设计部分总结

在设计部分我们主要讨论了氮化镓耿氏二极管在工作频率，输出功率，以及设计参数掺杂浓度 N 和器件有源区长度 L 上的一些约束条件。在这之后，通过对传统耿氏二极管的结构进行改进，给出了三种目前常用的氮化镓耿氏二级管的结构，并给出了有关它们掺杂浓度 N 以及有源区长度 L 的设计方法。

耿氏二极管管在振荡频率上的约束条件由下式给出：

$$f_m = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{ER} + \tau_{ET}} \quad (26)$$

其中  $\tau_{ER}$  由下式给出：

$$\tau_{ER} = \frac{\sqrt{2m_{eff}\Delta E}}{qE_{th}} \quad (27)$$

器件各主要部分部结构名称	具体数值
器件直径	5um
有源区掺杂浓度	$1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
有源区长度	0.5um
Notch 层掺杂浓度	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Notch 层长度	0.2um
N <sup>+</sup> 型 SiC 衬底厚度	150~300um
AlN 层厚度	30~50nm
底层 N <sup>+</sup> 氮化镓掺杂浓度 (阳极)	$2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
底层 N <sup>+</sup> 氮化镓厚度 (阳极)	0.5um
顶层 N <sup>+</sup> 氮化镓掺杂浓度 (阴极)	$2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
顶层 N <sup>+</sup> 氮化镓厚度 (阴极)	1~3um

图 20: 参数列表

耿氏二极管在输出功率上的约束条件由下式给出:

$$P_m f^2 Z = (E_b v_{sat})^2 \quad (28)$$

耿氏二极管的材料设计参数掺杂浓度 N 和有源区长度 L 由下面两式概述:

$$(NL) \geq (NL)_0 \equiv \frac{3\varepsilon v_{PEAK}}{q\mu_{ndr}} N_{crit} = \frac{\varepsilon F_{TH}}{q} \quad (29)$$

## 四、 制造流程示意图

本节主要给出一个基于下面仿真所采用的带 Notch 层的耿氏二极管制造流程的示意图。制造流程图:

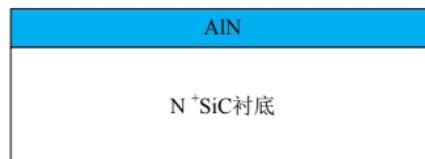


图 21: 第 1 步

第一步: 采用 MOCVD 的方法, 在 N<sup>+</sup>SiC 衬底上低温生长 AlN 缓冲层。该层在器件结构中的主要作用在于减小氮化镓和 SiC 直接接触产生的晶格失配问题。对于衬底材料的选择, 现在更加趋向于 SiC。以 SiC 做为衬底的氮化镓耿氏器件具有理想的散热特性, 更适合于太赫兹领域。目前应用于微波毫米波的氮化镓功率器件绝大部分采用 SiC 衬底。而且其机械强度远高于氮化镓衬底和蓝宝石衬底, 是制造太赫兹耿氏器件的理想材料。

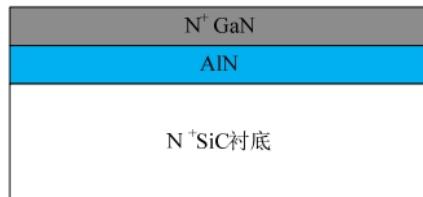


图 22: 第 2 步

第二步: 采用 MOCVD 的方法外延生长一层掺杂浓度为  $2.5 \times 10^{18} cm^{-3}$  的  $N^+$  氮化镓, 厚度约为 0.5um。这一层用作欧姆接触层。

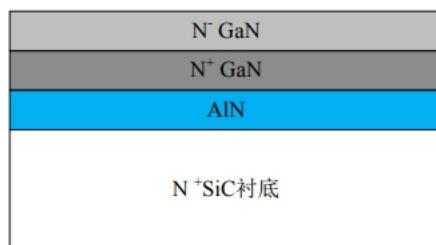


图 23: 第 3 步

第三步: 采用 MOCVD 的方法外延生长一层掺杂浓度为  $1.5 \times 10^{17} cm^{-3}$  的  $N^-$  氮化镓, 厚度约为 0.5um。这一层用作器件的渡越层。

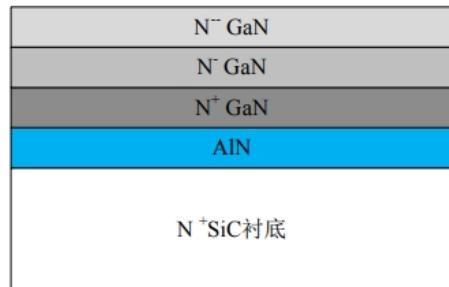


图 24: 第 4 步

第四步: 采用 MOCVD 的方法外延生长一层掺杂浓度为  $5 \times 10^{16} cm^{-3}$  的  $N^-$  氮化镓, 厚度约为 0.2um。这一层用作器件的 Notch 层。

第五步: 采用 MOCVD 的方法外延生长一层掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} cm^{-3}$  的  $N^+$  氮化镓, 厚度约为 1~3um, 这一层用作器件的欧姆接触层

第六步: 采用 RIE 刻蚀形成大圆形台面, 刻蚀深度至 SiC 衬底。

第七步: 采用自对准技术在刻蚀露出的 SiC 面上淀积 Ni/Pt/Au 多层金属, 经剥离形成 SiC 衬底正面连接电极; 同时在 SiC 衬底背面淀积 Ni/Pt/Au 多层金属, 构成衬底电极, 即耿氏二级管的阳极。



图 25: 第 5 步

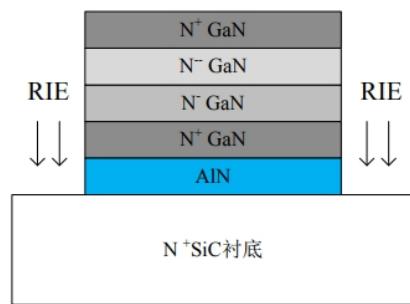


图 26: 第 6 步

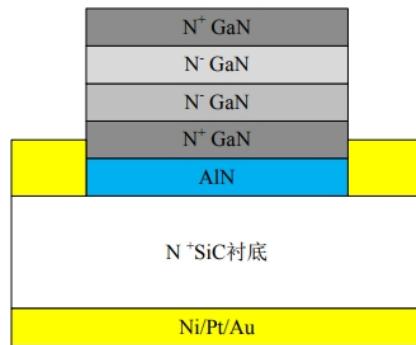


图 27: 第 7 步

第八步: 采用常规快速退火工艺, 使得 SiC 衬底正反两面与金属之间均形成欧姆接触。

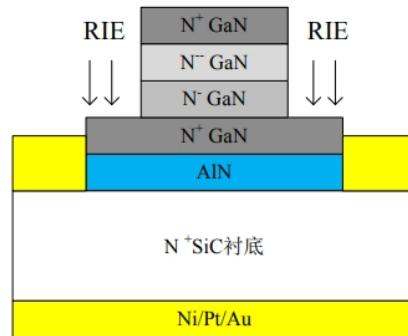


图 28: 第 9 步

第九步: 在大圆形氮化镓台面上继续 RIE 刻蚀, 形成耿氏二极管的小圆形有源台面, 刻蚀深度至  $N^+$  氮化镓下电极欧姆接触层

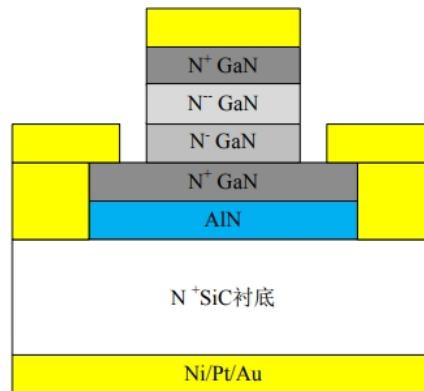


图 29: 第 10 步

第十步: 在氮化镓圆形有源台面上和刻蚀出的氮化镓下电极欧姆接触层台面上同时淀积 Ti/铝/Ni/Au 多层金属, 经剥离, 形成圆形上电极即耿氏二级管的阴极, 同时形成同轴环形连接电极, 并交叠覆盖于由步骤 (6) 形成的 SiC 衬底正面连接电极上, 并经常规快速退火工艺过程, 使氮化镓与圆形电极金属和环形连接电极金属间形成欧姆接触。

第十一步: 经历以上步骤后, 采用电镀工艺加厚阳极和阴极的金层, 有利于封装时引线和散热体的烧结键合。形成的器件结构如下图所示。

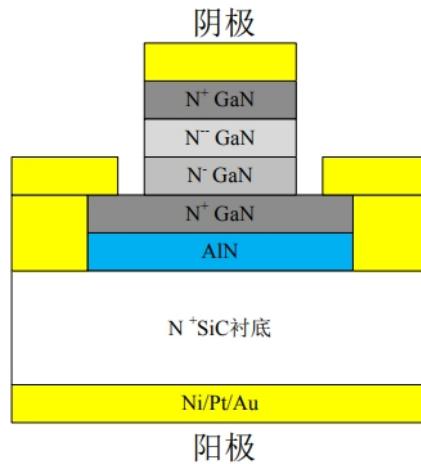


图 30: 完整的 GaN 耿氏二极管剖面图

## 五、生产安全防护、社会与环境因素

### 1. 镓对人体健康的影响

人体内镓的含量特别低,例如,体重为 70kg 的人体内只含有 0.7mg 的镓。人体内的镓可能来源于水源、食物等。

纯镓并不会对接触者产生危害,而且有些镓的放射性化合物也被应用到医学领域,如枸橼酸镓常用于肺癌和肝癌的诊断、淋巴系统肿瘤的诊断和分期、肿瘤疗效观察和活动性炎症灶的探查。此外,有研究报告指出,微量元素镓是人体的抗癌及强骨固钙剂,对大骨节病有防治效果。

虽然小剂量的镓对人体没有危害,但镓的一些化合物,尤其是含有砷、碲、磷、氯等有毒物质的化合物,如果摄入过量,则会对人体产生不良影响,例如短时间接触大剂量的氯化镓(III)就会引起不良反应,如咽喉发炎、呼吸困难、胸痛等,而它的烟雾则能引起更严重的不良反应,如肺水肿和局部瘫痪。因而人们在接触大剂量的镓化合物前应确认该物质是否会对健康产生不良影响,并采取相应保护措施,如戴手套、穿工作服等。

### 2. 安全防护

- 由于本产品的生产需要用到大量的氮化镓材料,而镓的化合物,尤其是含有砷、碲、磷、氯等有毒物质的化合物对人体有害,因此本实验要定时检测工厂内部砷、碲、磷、氯等元素的含量,以及时预防危险情况的发生。
- 产品生产过程中涉及到高温操作,在使用时应对员工进行培训,并在危险处贴好标识,防止危险情况发生,并且做好应急预案。

### 3. 社会与环境因素

- 能源效率: 设计过程中应最大限度地提高能源效率, 减少对非可再生能源的依赖。
- 废弃物管理: 最小化生产过程中产生的废弃物, 采用循环经济的原则; 合规地处理和处置任何有害废弃物。
- 环境监测: 实施定期的环境监测, 以确保生产过程没有不良的环境影响。
- 水质检测: 定期监测废水排放, 确保符合环境法规。
- 遵守当地和国家的环境法规, 确保生产活动不违反法规标准; 遵守相关安全标准, 确保员工和工厂的安全。

## 参考文献

- [1] 张旭虎. GaN 耿氏二极管及振荡器设计 [D]. 西安电子科技大学,2011.
- [2] 赵乐乐.GaN 基 MIS-HEMT 器件太赫兹耿氏振荡研究 [D]. 西安电子科技大学,2022.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2022.001994
- [3] 李玉梅.GaN 基太赫兹耿氏二极管结构及工艺研究 [D]. 西安电子科技大学,2018.
- [4] 付宇. 基于 GaN-HEMT 器件的栅控太赫兹耿氏振荡研究 [D]. 西安电子科技大学,2021.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2021.000900
- [5] 汪瑛. 太赫兹波段 GaN 基类 HEMT 平面耿氏二极管的研究 [D]. 西安电子科技大学,2016.