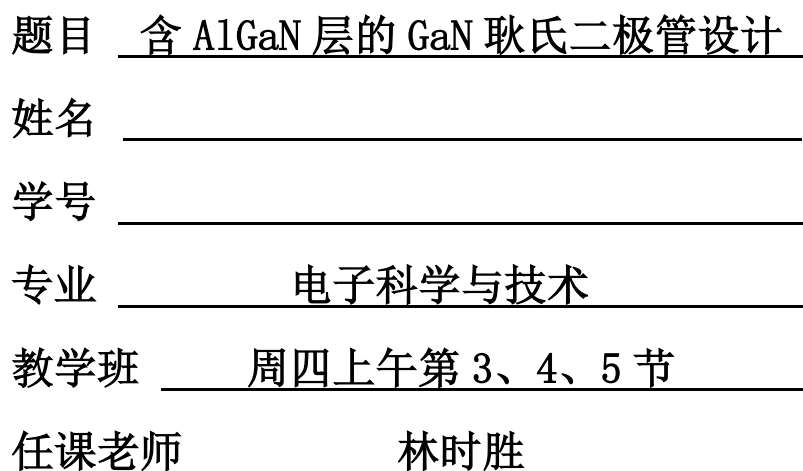


《信息电子学物理基础》 设计报告



摘 要

太赫兹技术是当今学界的研究热点,而耿氏二极管是太赫兹领域中不可或缺的核心器件。

目前常见的耿氏二极管以 GaAs、InP、GaN 等材料作为基底,其中以 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点,其负阻振荡频率可达 750GHz,远高于以传统 GaAs 材料作为基底的 140GHz,输出功率也比 GaAs 高一到两个数量级。这种良好的高频高功率特性使 GaN 耿氏二极管在微波大功率器件领域受到广泛关注。

本文对比传统耿氏二极管结构,设计了带 AlGaN 加速层的 GaN 耿氏二极管。该结构能够很好地减少“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。此设计下的耿氏二极管工作频率可达 300GHz 以上。

关键词: 耿氏二极管 GaN AlGaN 加速层

目录

1.设计背景.....4

2.耿氏效应.....4

3.含 AlGa_N 层的 GaN 耿氏二极管设计7

4.生产安全防护和社会环境因素 13

5.总结..... 14

参考文献..... 15

1.设计背景

近年来，太赫兹（THz）技术迅速发展，在宽带通信、探测雷达、安保检测、生物制药、深空探测、半导体材料等领域取得了广泛的应用成果。半导体固态信号源和光学信号源是两种主要的太赫兹信号源，相比与光学信号源，半导体固态信号源成本较低，脉宽较窄，能量更集中，伴随着微电子制造技术的发展，半导体固态信号源逐渐成为学界研究的热点。

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，在众多的转移电子器件中具有巨大的应用潜力。

现设计一个工作频率在 2GHz 以上、不含 PN 结或 LC 回路的耿氏二极管振荡器。

2.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，从宏观上看就好像表现出了电阻为负，这种效应叫做耿氏效应，也叫做微分负阻效应，用这种性质做成的器件叫做耿氏器件。

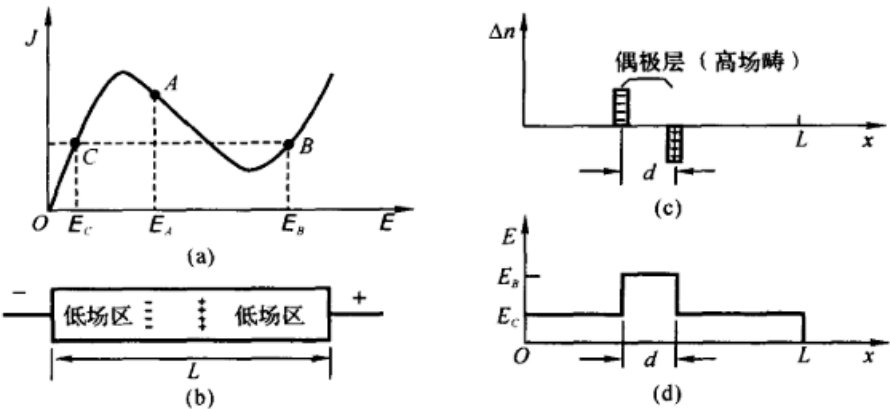


图 2.1 GaAs 耿氏效应 (a) $J \sim E$ 关系 (b) 偏置在 E_A 时形成的高场畴 (c) 电子浓度分布 (d) 偶极层中电场

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 $3000V/cm$ 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。

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 μ_1 、 μ_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 $n = n_1 + n_2$ 。

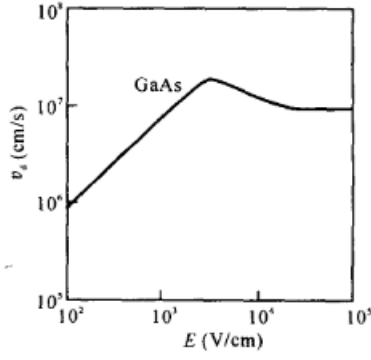


图 2.2 GaAs 的 $V_d \sim E$ 关系

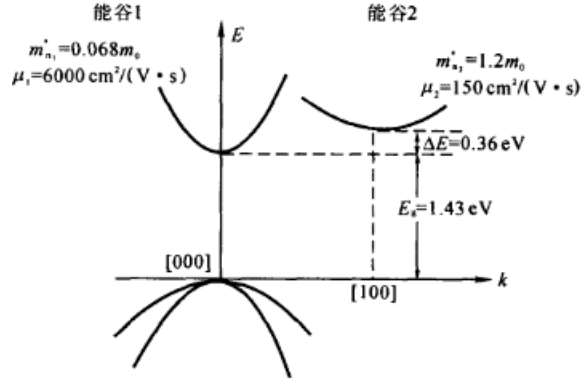


图 2.3 GaAs 能带图

牵引率计算公式为：

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*} \quad (2-1)$$

式中 τ 为能量弛豫时间， m^* 为半导体材料中电子的有效质量。由此可见 $\mu_1 > \mu_2$ 。电导率的计算公式为：

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = e(n_1\mu_1 + n_2\mu_2) = ne\bar{\mu} \quad (2-2)$$

其中 $\bar{\mu}$ 为平均迁移率：

$$\bar{\mu} = \frac{n_1\mu_1 + n_2\mu_2}{n_1 + n_2} \quad (2-3)$$

平均漂移速度为：

$$\bar{v}_d = \bar{\mu}|E| = \frac{n_1\mu_1 + n_2\mu_2}{n_1 + n_2}|E| \quad (2-4)$$

电流密度为：

$$J = n_1e\mu_1|E| + n_2e\mu_2|E| = ne\bar{\mu}|E| = ne\bar{v}_d = (\sigma_1 + \sigma_2)|E| \quad (2-5)$$

当电场强度较低（低场区 C）时，中心谷与卫星谷的能谷差为 0.36eV ，远大于室温下的 $k_B T \approx 0.026\text{eV}$ ，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 $J = n_1e\mu_1|E| = \sigma_1|E|$ ，平均漂移速度 $\bar{v}_d = \mu_1|E|$ ；当电场增加（后 C 区），中心谷的部分电子获得了足够的跃迁能量，从中心谷跃迁至卫星谷， n_1 减小， n_2 增大，此时仍满足 $n_1 > n_2$ ，但由于 $\mu_1 > \mu_2$ ，载流子平均漂移速度 \bar{v}_d 和电流密度 J 随电场增加而增加的速度变缓，器件偏离欧姆定律，各参数的计算方式参照式 2-2 至 2-5；电场继续增加（A 区），此时大量中心谷电子跃迁至卫星谷， $n_1 < n_2$ ，因为 $\mu_2 < \mu_1$ ， $J = n_1e\mu_1|E| + n_2e\mu_2|E| = (\sigma_1 + \sigma_2)|E|$ ， $\bar{v}_d = \bar{\mu}|E|$ ，可见 \bar{v}_d 和 J 随电场增加而减小，出现微分负阻区；电场继续增加（B 区），所有电子基本跃迁至卫星谷，因此 $n_1 \approx 0$ ， $n_2 \approx n$ ，欧姆定律再次满足。

应当注意的是，并不是当外加电压使样品内部的电场强度大于临界电场强度、材料处于负微分电导区时，材料就可以发生耿氏振荡。假设有一块均匀掺杂的半导体样片，当把材料偏置在负微分迁移率区时（且内部电场均匀分布），则该半导体内部的载流子在热力学上是不稳定的。材料中任何存在的空间电荷满足下面的方程：

$$Q(x, t) = Q(x - vt, 0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2-6)$$

其中 τ 为能量弛豫时间，由下式给出：

$$\tau = \frac{\varepsilon_s}{\sigma} = \frac{\varepsilon_s}{qN_D\mu_d} \quad (2-7)$$

式中 N_D 为掺杂浓度， $\mu_d = \frac{dv}{dE}$ 为微分迁移率。

从上面的表达式中可以得出：在低场的情况下， $\mu_d > 0$ ，在材料中存在的电荷以时间常数 $\tau = \tau_d$ 衰减，在材料中的电场强度超过阈值强度时， $\mu_d < 0$ ，材料中的电荷会不断增大。增大因子由下式给出：

$$\frac{l}{v\tau} = \frac{l|q|N_D\mu_d}{\varepsilon_s v} > 1 \quad (2-8)$$

式中 l 为器件长度， v 为载流子漂移速度。可以等价地得到下式：

$$N_D l > \frac{\varepsilon_s v}{|q|\mu_d} \quad (2-9)$$

如果上面的增长因子超过了阈值范围，由于电子的涨落会产生偶极畴。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。

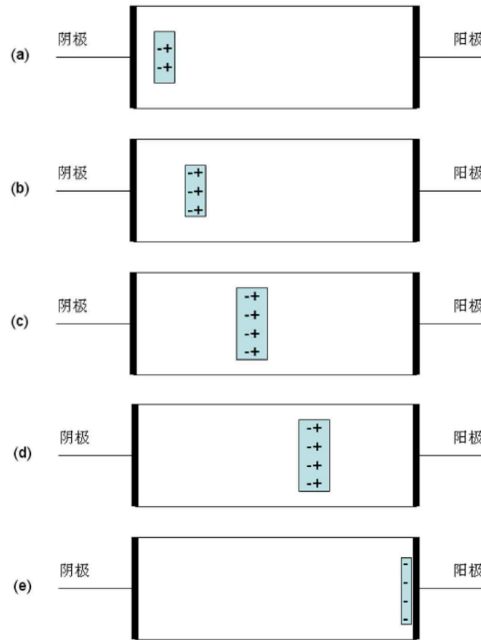


图 2.4 偶极畴的运动过程 (a)畴在阴极附近形成 (b)畴一边漂移一边生长 (c)畴完全形成并以畴外电子的平均漂移速度运动 (d)稳定的畴继续向阳极渡越 (e)畴到达阳极并被阳极吸收而消失

由于畴的形成，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。

我们把畴区消失与形成的时间 Δt_1 称为脉冲宽度，把畴区漂移时间（渡越时间） Δt_2 称为脉冲周期，由此可得振荡频率：

$$f = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{v_d}{L - d} \approx \frac{v_d}{L} \quad (2-10)$$

式中 v_d 为电子漂移速度， L 为二极管有源区的长度。

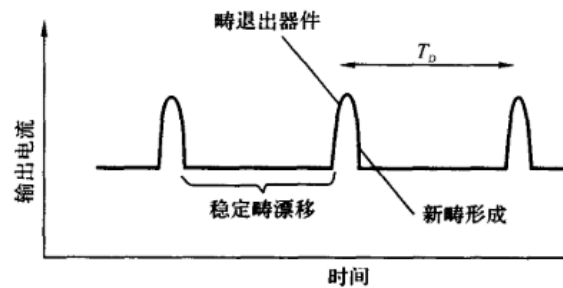


图 2.5 GaAs 耿式器件中的振荡电流

3.含 AlGa_N 层的 GaN 耿氏二极管设计

3.1. GaN 材料的优势

本次设计选择 GaN 材料。目前主要研究的是具有纤锌矿结构的氮化镓，其能带图如图 3.1 所示。从图中可以看出，纤锌矿结构的氮化镓材料的价带极大值位于 $K=0$ 处，其禁带宽度 $E_g = 3.39\text{eV}$ ，其导带拥有两个卫星能谷。不同温度下纤锌矿 GaN 材料的电子漂移速度随外加电场强度的变化如图 3.2 所示。这两点都与 GaAs 相似，因此 GaN 同样具有负微分电阻现象，可作为耿式器件的材料。但是，与图 2.3 对比，GaN 与 GaAs 也有很多不同之处。相比于以 GaAs 为代表的传统耿氏效应半导体材料（参数参考表 3-1），GaN 材料的优势和突出特点主要表现在：

1. 宽禁带宽度

氮化镓材料的禁带宽度为 3.39eV ，远远大于硅的 1.12eV 和砷化镓的 1.42eV ，抗辐射能力强，很适合于在空间科学和技术中应用。同时由于常温下，宽禁带半导体材料的本征载流子密度极低，故 GaN 材料的稳定性更好，最高稳定温度可达 750°C 。

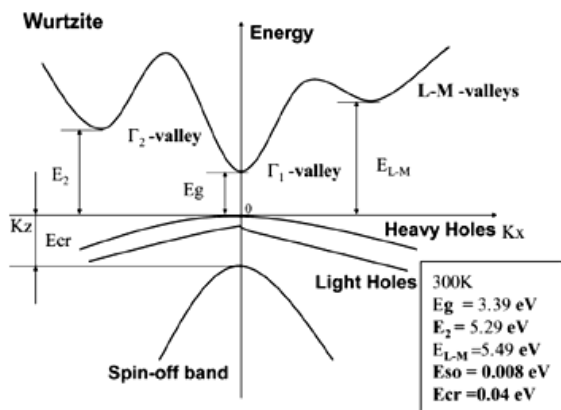


图 3.1 GaN 能带图

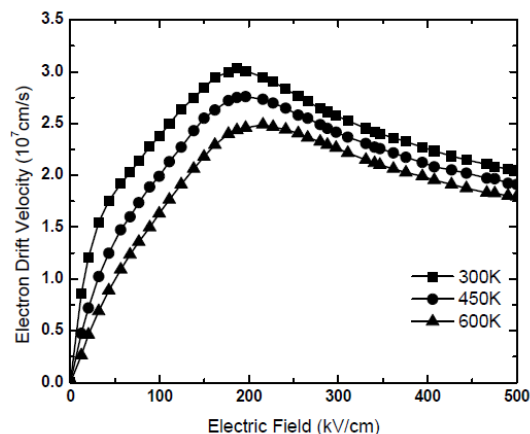


图 3.2 不同温度下纤锌矿结构的氮化镓材料的速场关系图

表 3.1 几种常见半导体材料的有关参数

| | Si | GaAs | SiC | ZnSe | GaN |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|
| 带隙类型 | 间接 | 直接 | 间接 | 直接 | 直接 |
| 禁带宽度 (eV) | 1.12 | 1.43 | 3.2 | 2.58 | 3.42 |
| 熔点 (°C) | 1420 | 1238 | 2830 | 1500 | 1700 |
| 热导率 (W/cm·K) | 1.4 | 0.54 | 4.9 | — | 1.5 |
| 电子迁移率 (cm ² /Vs) | 1350 | 6000 | 800 | 100 | 900 |
| 击穿电场 (V/cm) | 6.0 × 10 ⁵ | 6.5 × 10 ⁵ | 3.5 × 10 ⁶ | — | 5 × 10 ⁶ |
| 介电常数 | 11.9 | 13.2 | 9.7 | 8.1 | 8.9 |
| 饱和速度 (cm/s) | 1.0 × 10 ⁷ | 2.0 × 10 ⁷ | 2.0 × 10 ⁷ | — | 2.5 × 10 ⁷ |

2.高热导率

SiC 热导率约是 Si 的两倍，是 GaAs 的六倍多，并且超过了金属铜。采用高热导率材料可以缩小器件的芯片面积、提高功率密度。氮化镓与 SiC 的晶格失配较小，可以在 SiC 衬底上进行高质量氮化镓材料的异质外延，因此氮化镓器件可以充分利用 SiC 的高热导率特性。用 SiC 衬底氮化镓材料制造的电力电子器件可以比硅器件在同等耐压能力下传输更高的电流密度，而作为集成电路材料则可以使电路的集成度大大提高。

3.高临界击穿电场强度

GaN 临界击穿电场远远高于 GaAs 和 Si。因此，在漂移区或基区宽度相同的情况下，GaN 半导体器件可以承受更高的外加电压；或在耐压额定值相同的情况下，GaN 器件的漂移区可以设计得更窄，因而导通电阻很小，可以传输更大的电流。

4.高载流子饱和速度

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。

5.高稳定性

GaN 宽禁带半导体材料基本不受任何化学溶剂的腐蚀，适合于在恶劣环境下应用。

6.介电常数小

GaN 的相对介电常数为 9.8，比 Si 和 GaAs 都小。因此，在相同掺杂浓度和外加电压的条件下，氮化镓器件 PN 结电容较小，适合于高频应用。

7.与当前工艺技术的兼容性好

GaN 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。

综上所述，我们选择 GaN 作为本次耿氏二极管设计的材料。

3.2. GaN 二极管结构设计

首先，有源区不能与电极直接接触，这是因为当电极的金属与有源区直接接触时，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 3.3 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 ，电压梯度大，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。

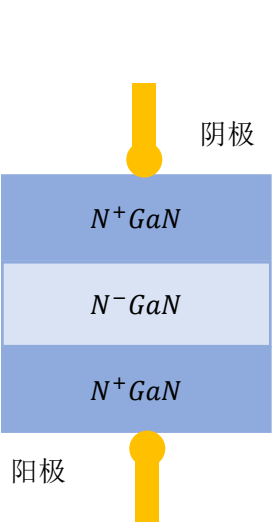


图 3.3 有过渡区的 GaN 耿氏二极管结构



图 3.4 有过渡区、带 Notch 层的 GaN 耿氏二极管结构

此外，耿氏二极管实际工作时，微分负阻并不是立即出现的。根据第二章介绍的耿氏二极管工作原理可知，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。为了解决该问题，一种方法是在有源区中加入带 Notch 层的结构，如图 3.4 所示。GaN Notch 层能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，因此可以减小死区长度，提高耿氏振荡频率。Notch 层的掺杂浓度一般为 $\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 量级。

但是实际情况下，含 Notch 结构的有源区长度 L 非常大，为 $1\mu\text{m}$ ，这在一定程度上牺牲了器件输出脉冲频率。针对以上存在的问题，设计了图 3.5 所示的器件结构，选用 AlGaN

来代替 GaN 作为 Notch 层, 该层处于阴极欧姆接触区与有源区之间, 通常称为电子发射层。

由于氮化物材料本身具有很强的自发极化和压电极化效应, 出现很多极化电荷, 产生内建电场, 使得电子提前在该区域得到加速获得足够的能量, 由低能谷跃迁至高能谷, 发生电子转移, 促进偶极畴快速的形成, 从而缩短死区长度。从整体上来看该过程非常类似于电子是由 AlGa_N 这一层发射到有源层, 所以称该层为电子发射层。实质上与图 3.4 中 GaN Notch 的作用一样, 仍然是对电子的加速, 使电子获得足够的能量发生转移快速形成畴。由于内建电场非常强, 加快了畴的形成, 所以该结构的优势是允许的器件尺寸可以更小, 提高了振荡频率。



图 3.4 有过渡区、带 AlGa_N 加速层的 GaN 耿氏二极管结构

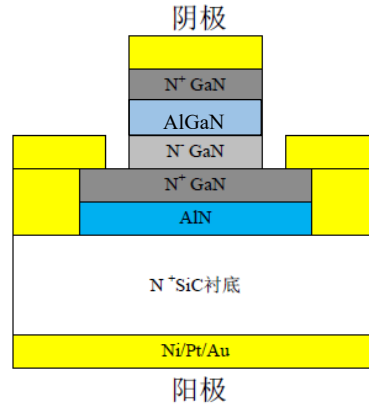


图 3.5 实际工艺下带 AlGa_N 加速层的 GaN 耿氏二极管结构图

实际工艺加工下的成品结构图如图 3.5 所示。利用化学气相沉积法（CVD）等常见工艺可以制成性能良好、稳定性强的二极管结构。 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 为缓冲层, 用于缓冲 GaN 与 N^+ SiC 或 sapphire 衬底之间的晶格失配。电极材料为镍、铂、金等导电性良好的材料。

3.3.相关参数计算

（1）最大工作频率计算

工作频率的计算方式已由式 2-10 给出, 现重写如下:

$$f = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{v_{sat}}{L - d} \approx \frac{v_{sat}}{L} \quad (3-1)$$

此时 v_{sat} 为电子饱和漂移速度。

（2）最大输出功率计算

由于半导体材料上的外加电场不能无限增加, 必须小于击穿电场 E_B , 因此器件上的最大偏压 V_D 为:

$$V_D = \frac{E_B v_{sat}}{f} \quad (3-2)$$

当器件外界电路的阻抗为 Z 时, 电路中的最大电流为:

$$I_m = \frac{V_D}{Z} = \frac{E_B v_{sat}}{Zf} \quad (3-3)$$

所以，器件的最大输出功率可表示为：

$$P_m = V_D I_m = \frac{(E_B v_{sat})^2}{Zf^2} \quad (3-4)$$

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。

(3) 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 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 3τ （ τ 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

$$R = \frac{L}{\sigma S} \quad (3-5)$$

$$C = \frac{\varepsilon S}{L} \quad (3-6)$$

式中 L 是 GaN 转移电子器件的长度， S 是横截面积，由以上二式可得到介电弛豫时间

$$\tau = RC = \frac{\varepsilon}{q\mu_{ndr}N} \quad (3-7)$$

式中 μ_{ndr} 称为负微分迁移率，对于 GaN 材料，其值约为 $50\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ ，对比 GaAs 材料的 μ_{ndr} 约为 $2500\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 。空间电荷的生长可用以下方程描述：

$$\Delta Q = \Delta Q(0) \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right) \quad (3-8)$$

由于需满足 $t > 3\tau$ ，即：

$$\frac{L}{v_{PEAK}} \geq \frac{3\varepsilon}{qN\mu_{ndr}} \quad (3-12)$$

其中 v_{PEAK} 为最大电子漂移速度。所以：

$$NL \geq (NL)_0 = \frac{3\varepsilon v_{PEAK}}{q\mu_{ndr}} \quad (3-13)$$

$(NL)_0$ 为形成耿式振荡的 NL 临界值。

由式 3-1 可知，要想得到更高的频率就要减小 L ，因为有 $(NL)_0$ 的限制， L 减小， N 必然要增大，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器件过早地被击穿。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} ，临界掺杂浓度由下式给出：

$$N_{crit} = \varepsilon \times \frac{E_{TH}}{q} \quad (3-14)$$

式中 E_{TH} 为临界电场。参考表 3.1 可知，由于 GaN 具有很高的临界电场，GaN 材料具有很高的临界掺杂浓度 N_{crit} 。同时由于 GaN 材料的载流子具有很高的峰值速度，并且其的负微分迁移率比较低，所以 GaN 材料相比 GaAs 材料具有更高的 $(NL)_0$ 。经计算，针对 GaN 材料， $NL \geq 5.3 \sim 8.2 \times 10^{12} cm^{-2}$ ， $N_{crit} < 2.8 \sim 4.3 \times 10^{18} cm^{-3}$ 。

具体设计的器件参数如表 3.2 所示。

表 3.2 含 AlGaIn 加速层的 GaN 耿氏二极管器件参数列表

| 器件各主要部分结构名称 | 器件参数 |
|--------------------------------|------------------------------|
| 器件直径 | $5\mu m$ |
| AlGaIn 加速层厚度 | $0.15\mu m$ |
| AlGaIn 加速层掺杂浓度 | $5 \times 10^{16} cm^{-3}$ |
| 加速层 Al 组分 | 8% |
| 有源区长度（N-GaN） | $0.5\mu m$ |
| 有源区掺杂浓度 | $1.5 \times 10^{17} cm^{-3}$ |
| N ⁺ 型 SiC 衬底厚度 | $200\mu m$ |
| AlN 层厚度 | $40\mu m$ |
| 底层 N ⁺ GaN 掺杂浓度（阳极） | $5 \times 10^{18} cm^{-3}$ |
| 底层 N ⁺ GaN 厚度（阳极） | $0.05\mu m$ |
| 顶层 N ⁺ GaN 掺杂浓度（阴极） | $5 \times 10^{18} cm^{-3}$ |
| 顶层 N ⁺ GaN 厚度（阴极） | $1.5\mu m$ |

根据上述参数和分析，假设工作电压 $V = 40V$ ，则有源区工作电场 $E = \frac{V}{L} = 800kV/cm$ ，

$$\text{振动频率 } f \approx \frac{v_{sat}}{L} = \frac{1.5 \times 10^5 m \cdot s^{-1}}{0.5 \mu m} = 300GHz。$$

3.4.参考仿真结果

查阅参考资料，按照上述方法和参数设计的耿氏二极管的工作参数如表 3.3 所示。

表 3.3 参考仿真结果

| 电压（V） | 频率（GHz） | 直流分量（mA） | 交流分量（mA） | 直流功耗（mW） |
|-------|---------|----------|----------|----------|
| 39 | 362.5 | 39.23 | 0.97 | 1529.97 |
| 40 | 350.0 | 39.35 | 1.91 | 1574.00 |
| 43 | 350.0 | 39.76 | 2.40 | 1709.68 |

仿真结果表明设计的 AlGaIn 发射层 GaN 耿氏二极管可以振荡并产生 350GHz 左右的太赫兹波输出，该器件设计得到了很好的验证。观察仿真过程中不同电压下各参数的变化，发现随着电压的增加电流幅值增加，器件振荡频率降低，器件在 40 V 时电流有饱和趋势，在 43 V 时达到饱和状态进入期望的工作区域，获得持续稳定的太赫兹波输出。电压增加电流幅值不断增加是因为在高压大电场下，允许器件内有越来越多的电子发生低能谷向高能谷的转移，参与偶极畴的形成，畴的大小可以达到更大尺寸，所以运动到阳极释放出的电流脉冲增加。但是随着畴尺寸的增加，畴受到的散射几率增加，畴的运行速度降低，导致输出频率随着电压的增加而降低。最终外加电压为 43 V 时输出频率为 350 GHz，交流分量为 2.4 mA 的连续

太赫兹波，直流功耗为 1709.68 mW，交直流转化效率为 6.04%左右。

以上分析结合器件结构可知该器件设计最大的优点就是能够在小尺寸下获得连续稳定的太赫兹输出，输出的频率、功率和转化效率都比较高。

3.5.等效电路

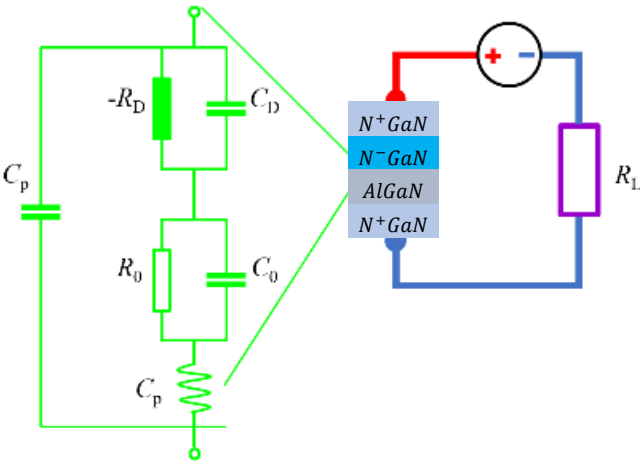


图 3.6 耿氏二极管等效电路

该耿氏二极管的等效电路如图 3.6 所示，金属导体材料可以用电阻表示，绝缘体介质可以用电容表示，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。除此之外还要加上寄生的电容与寄生的电感，以及二极管所存在的势垒电容。

3.6.补充说明

上述设计基于 $AlGaN$ 层的 Al 组分为 8%，如果改变 Al 组分，或是采用多层 $AlGaN$ 加速层的结构，器件的饱和和工作电压、输出功率、器件内的场分布等工作参数均会发生改变，其特性也会随着外界温度的变化而有不同的变化趋势，这里仅提供一种达到预期要求且指标均较好的设计方案。

4.生产安全防护和社会环境因素

GaN 相对 $GaAs$ 对人体的影响较小。传统的耿氏二极管多采用 $GaAs$ 材料，但其中的 As 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 ， $GaAs$ 在加工时，如遇 $1000^{\circ}C$ 高温时，可产生 As_2O_3 气体，对人体造成一定的伤害，而 GaN 一般来说是无毒的。虽然在原料生产加工过程中产生的危害较小，但化学气相沉积法需使用部分对人体危害较大的无机试剂，也会产生危害人体的气体，且器件加工生产环境本身不能确保完全安全，故仍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。本设计工艺中可能包括的污染源有：含 Al 、 Au 等

金属元素的废水和包括洗涤液、溶解液等其他工业加工废水，制造各层材料时产生的固体废渣，高温加工时产生的含氮废气等，这些都需要按照国家相关标准进行处理和排放，如果发现污染物不能处理到安全标准，应立即停止生产，寻找替代材料或优化加工方法。

5.总结

本文给出了一种含 AlGa_N 加速层的 GaN 耿氏二极管设计方案，其工作频率可达 300GHz 以上，输出功率较大，功率转化效率较高，应用场景广泛，工作状态稳定，生产加工过程相对清洁，相比传统 GaAs 二极管在各方面性能均有所提升。

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*,2011,8:1-56.
- [2]万鑫.渐变 AlGa_N 加速层 GaN 耿氏二极管的研究. *西安电子科技大学硕士学位论文*,2013,2:1-39.
- [3]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*,2019,2:1-44.
- [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]许详. GaN 基太赫兹耿氏二极管新结构研究. *西安电子科技大学硕士学位论文*,2017,3:1-56.