

摘 要

太赫兹技术是被誉为未来重要的十大技术之一，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。本文旨在提供一种高温情境下、太赫兹频率区间的基于 GaN 的耿氏二极管振荡器的初步设计。设计重点和主要创新点如下：

（1）探索了 GaN 耿氏二极管的结构设计，包括电极设计和掺杂结构设计，确定了纵向上下电极结构和 Al 掺杂的 Notch 层 GaN 耿氏二极管的结构；

（2）对 Al 掺杂的不同形式进行讨论，确定了三步分级 Al 掺杂的 Notch 层的最优设计。

本文的最后给出了一个工作温度在 500 K，工作频率在 600 GHz 的三级分布 Al 掺杂的 Notch 层 GaN 耿氏二极管，并对此次设计进行工艺、环境等方面的评估。

关键词：GaN、耿氏二极管、AlGaN、太赫兹

目 录

1 设计背景	3
2 原理说明	3
2.1 耿氏效应	3
2.2 耿氏二极管	4
3 GaN 耿氏二极管设计	4
3.1 GaN 材料优势	4
3.2 GaN 耿氏管结构设计	5
3.2.1 电极结构设计	5
3.2.2 GaN 耿氏管设计	5
4 设计评估	7

1 设计背景

太赫兹 (THz) 波长在医学成像、生物学、安全、电信、制药、传感器、质量控制机制或航空航天工业等不同领域的不同应用中具有重要意义。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。

现设计一个工作于 500 K、工作频率约于 600 GHz 的 GaN 耿氏二极管。

2 原理说明

2.1 耿氏效应

耿氏效应(Gunn effect)是 1963 年由耿氏(J.B.Gunn)发现的一种效应: 在耿氏二极管的两端加电压, 当电压到达阈值时, 其电流会降低, 呈现出负阻特性。耿氏效应现象是由如 GaAs, InP, GaN 这样的半导体能带结构特殊性造成的, 见图 1 (a)。图 1 (b)显示, 在中心[000]处存在最低能谷, 称作中心(Γ -valley), 大量的电子处于这个能谷中; 在[111]方向存在次能谷, 称为卫星能谷(Satellite L-valley)。畴在 GaAs 或者 InP 这样的III-IV族的半导体样品不同的能谷中, 电子具有不同的漂移速度。电子在中心能谷漂移速度较于卫星能谷中漂移速度更高, 电子有效质量更小。当电压被加载到一定值(此时电压通常称作阈值电压), 电子从中心能谷跃迁到卫星能谷, 进行导电, 由于电子速度不同而引起在一个方向电子积累, 在另一方向电子耗尽, 生成一个耿氏畴。这个畴在通过从样品的阴极到阳极的过程中长大, 在阳极会被吸收。这时一个新的耿氏畴又会生成, 然后继续向阳极方向移动, 耿氏畴周而复始地生成, 这样便会形成振荡, 振荡周期 $f \approx \frac{v_d}{L}$, v_d 为电子漂移速度, L 是二极管有源区的长度。

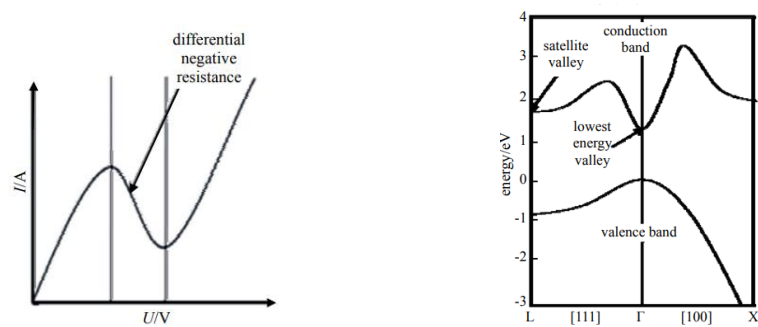


图 1 耿氏效应

(a)负阻效应示意图

(b)GaAs 的能带结构

2.2 耿氏二极管

耿氏二极管的结构一般分为 3 层，中间为掺杂较低的传输区域，两边是掺杂较高的区域。形成 $n^+n^-n^+$ 结构，见图 2。耿氏二极管的结构对耿氏二极管的频率和功率有着强烈的影响，其输出频率由耿氏畴从阴极到阳极的传输时间而定。阴极注入的电子大部分位于 Γ 能谷中，需要获得足够的能量而跃迁到 L 能谷，这过程对于畴的形成产生了延迟，电子在低能谷向高能谷跃迁的时间内，从阳极到阴极经过的距离称作耿氏管“死区”。由于“死区”的存在，畴渡越的长度缩短，即畴渡越的时间缩短了，因此导致输出功率降低。“死区”对输出的高频耿氏管影响很大，减少“死区”长度和适当的渡越区长度，能有效提高耿氏器件的频率和功率。

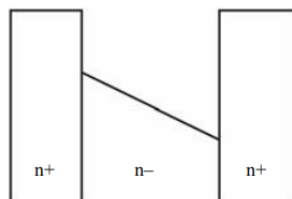


图 2 耿氏管一般结构

3 GaN 耿氏二极管设计

3.1 GaN 材料优势

传统的 GaAs 和 InP 耿氏管由于散射机制(Scattering mechanism)和能量弛豫频率(Energy relaxation frequencies)的限制，最多只能延展到 300GHz；而 GaN 材料具有诸如宽禁带、高

饱和速率和高击穿场强等优越特性,使得基于 GaN 的耿氏管在 300GHz 以上的极高频率(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 140GHz¹)下,能够以更高的功率工作。

3.2 GaN 耿氏管结构设计

3.2.1 电极结构设计

目前,氮化镓基耿氏二极管主要采用两种电极结构:平面同轴电极结构和纵向上下电极结构。

平面同轴电极结构因其制备材料和器件工艺相对简单已经得到广泛研究应用,且与当前广泛采用的氮化镓器件平面工艺技术兼容。然而,这种同轴电极结构的耿氏二极管因为器件使用高阻性衬底,在器件封装时面临的主要问题是必须从正面引出阴极和阳极。因此,在高偏压下,两电极之间的空间距离非常接近时,会产生极高的电场,容易产生电弧和击穿漏电现象。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 150KV/cm 以上的临界电场强度²,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。

纵向上下电极结构采用衬底电极,在空间上隔离了两个电极,有效抑制了电迁移带来的击穿现象。同时,这种大面积的衬底电极结构还减小了二极管的寄生串联电阻,从而有利于器件的散热。对于在太赫兹频段工作的器件而言,这些优势在振荡频率稳定性和输出功率特性方面显得特别重要。因此本文选取纵向上下电极结构。

3.2.2 GaN 耿氏管设计

本文基于 Notch 掺杂 GaN 耿氏管结构,创新性地 Notch 层的 n-GaN 掺杂替换为 AlGaIn。耿氏二极管实际工作时,微分负阻效应(Negative differential effect)并不是立即出现的,这种现象就体现在上文所述的死区长度上。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,本文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 GaN 层(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 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,

¹ 白阳,贾锐,刘新宇,等. 基于耿氏效应的太赫兹源的研究进展[C]. 第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会议论文集. 2012:266-273.

² Egor Alekseev and Dimitris Pavlidis. GaN Gunn diodes for THz signal generation. 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2000, 3: 1905-1908.

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。而在 Notch 层的基础上进一步掺杂 Al，可以让电子进一步加速，从而有效降低死区长度。³

图 2 显示，随着温度的升高，AlGaIn 发射极的 GaN 耿氏二极管的振荡频率逐渐提高，并在 500K 时超过 GaN Notch 掺杂的 GaN 耿氏管。因此在高温场景下，应当选用 AlGaIn 发射极，并且综合性能和工艺复杂度，选择三步分级 AlGaIn 发射极。

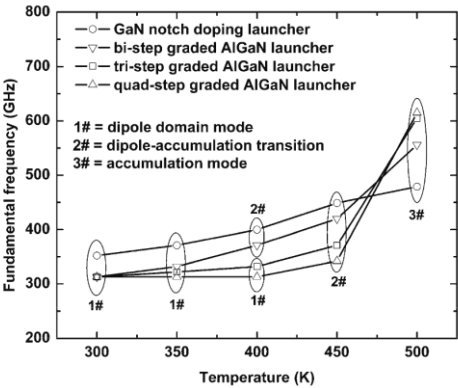


图 2 GaN 耿氏二极管结构设计.⁴ bi-step: 1%-Al(0.1um) / 8%-Al(0.1um); tri-step: 1%-Al (0.06um) / 8%-Al (0.07um) / 15%-Al (0.07um); quad-step: 1%-Al (0.05um) / 8%-Al (0.05um) / 15%-Al (0.05um) / 22%-Al (0.05um)

较为完整的 AlGaIn 发射极 GaN 耿氏二极管的结构图如图 3 所示，参数设计如表 3.2 所示。需要指出的是，AlGaIn 层的厚度是三步分级的，GaN 的浓度是 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，从阴极向阳极 Al 的掺杂浓度分别是 1%、8%和 15%，厚度分别为 0.06um，0.06um 和 0.07um。其他参数的确定见附录。

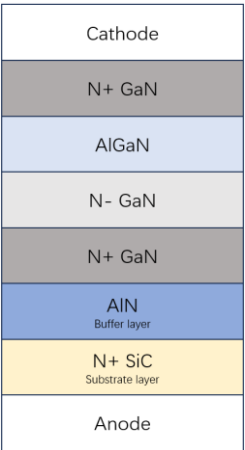


图 3 GaN 耿氏二极管结构设计

³ 张旭虎. GaN 耿氏二极管及振荡器设计. 2011. 西安电子科技大学, MA thesis.

⁴ Chunli Yu. Use of AlGaIn launcher in terahertz GaN Gunn diode. 2010 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 2010, 1: 1862-1864.

器件各主要部分结构名称	具体数值
器件直径	$5\ \mu m$
渡越区掺杂浓度	$1.5 \times 10^{17}\ cm^{-3}$
渡越区长度	$0.3\ \mu m$
AlGa _N 层掺杂浓度	$5 \times 10^{16}\ cm^{-3}$
AlGa _N 层长度	$0.2\ \mu m$
N+SiC 衬底厚度	$150\sim 300\ \mu m$
AlN 层厚度	$30\sim 50\ nm$
阴极 N+Ga _N 层掺杂浓度	$2.5 \times 10^{18}\ cm^{-3}$
阴极 N+Ga _N 层厚度	$1\sim 3\ \mu m$
阳极 N+Ga _N 层掺杂浓度	$2.5 \times 10^{18}\ cm^{-3}$
阳极 N+Ga _N 层厚度	$0.5\ \mu m$

表 3.2 GaN 耿氏二极管参数列表

4 设计评估

本文设计了高温情景下、太赫兹工作频率的耿氏二极管设计，采用 GaN 材料，创新设计了三步分级 Al 掺杂 GaN Notch 结构。

从工艺考量，器件掺杂浓度的精度要求并不会很高。主要的优化点在 Al 的掺杂方法上。从频率性能上看，四级分级 Al 掺杂的效果最佳，但是涉及步骤却繁琐许多；而三级分级 Al 掺杂的效果仅比 Al 弱 1%，也能达到 600 GHz 的要求，却能在工艺上省去一整道工序，因此此设计既考虑了产品的性能，有考虑了产品加工的经济性。

从环境角度评估，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，尤其是高温环境下，砷化镓可产生三氧化二砷气体，对人体造成一定的伤害，而氮化镓中的氮则相对地对人体和环境更为友好。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。

附录

GaN 耿氏二极管速场关系图 4 所示， GaN 的阈值电场在不同的温度下都为 200kV/cm 左右， 600 K 时载流子峰值漂移速度约为 $1.7 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ， 载流子平均漂移速度为 $1.23 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

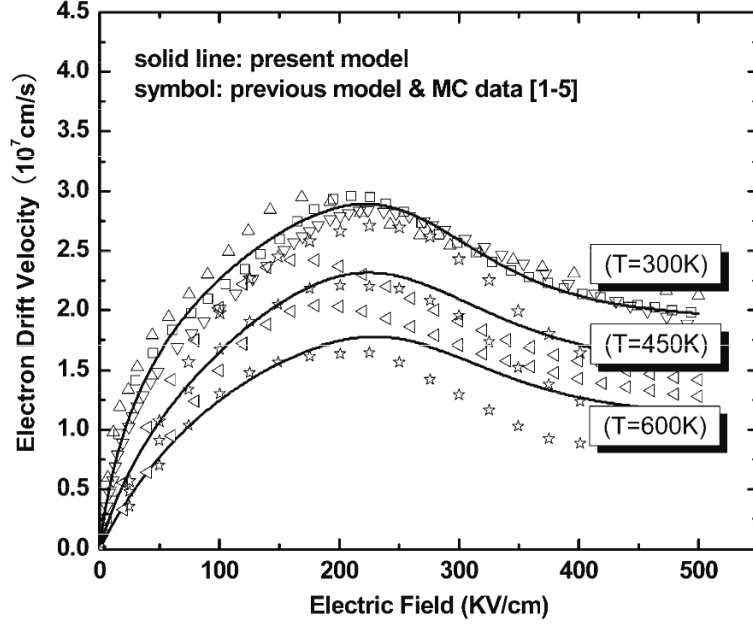


图 4 GaN 耿氏二极管速场关系图

因此可以选择工作电场 $E = 300 \text{ KV/cm}$ 。

载流子饱和速度 $v_d \approx v_s = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

由于器件的渡越时间必须大于介电弛豫时间，可以得到， $L_n > \frac{3\epsilon v_s}{e\mu_{NDR}}$ 。

根据振荡频率计算公式，

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

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

选定工作频率为 600 GHz，则可得有源区厚度可以取 $L = 0.3 \mu\text{m}$ 。

经检验掺杂浓度符合要求。

此时工作电压 $V \approx \frac{E}{L} = 100\text{V}$ 。