

# 浙江大学

## 本科实验报告

基于 GaN 的高频段耿式管设计

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 6, 2023

### Abstract

目前市面上主流的主要是基于 GaAs 半导体材料制作的耿式二极管，这种耿式二极管在高频段，尤其是目前热门的太赫兹频段下的工作功率较低，而对于采用 GaN 材料的耿式二极管，其工作功率至少在 GaAs 耿式二极管的 100 倍以上。同时，dc-to-RF 的效率在 2.7% 以上，从而使得用这种新式的耿式二极管可以产生更加强大的毫米波信号，能够在未来的太赫兹通讯中作为信号。

在本文中，我们将着重探讨采用 GaN 和 GaAs 两种材料的耿式二极管之间的区别，说明 GaN 材料的大禁带宽度、高临界场强、高热导率、高载流子饱和速率等优点，能大幅提高耿式二极管的品质因数和性能。

**关键词：**耿式二极管；氮化镓；振荡器

# 目 录

一、应用背景	4
二、耿式二极管工作原理	4
1. 从耿式效应到耿式二极管	4
2. 耿式二极管结构原理	5
三、GaN 耿式二极管设计	6
1. 总体设计考虑	6
2. 参数设计及说明	6
3. 制备工艺	7
4. 设计结果分析	10
5. GaN 耿式二极管的优势	12
四、对环境及社会的影响	12

## 一、 应用背景

耿式二极管是一种在高频率电子学中应用的二极管形式，它只由 N 型杂质半导体材料组成，具有负微分电阻效应，可以产生高频振荡信号。在微波和太赫兹领域，它可以作为振荡器、放大器、混频器、调制器、检波器等电路的核心元件，实现信号的产生、放大、变换、调制和检测等功能。耿式二极管的优点是结构简单、体积小、成本低、效率高、可靠性好、工作频率高等，缺点是输出功率较低、噪声较大、线性度较差、温度敏感等。

太赫兹波在电磁波谱中位于毫米波频段与红外频段之间的过渡区域，兼具毫米波与红外波的优良特性，在大气遥感、医学成像、信息通信、安检及军事安全等领域有巨大应用前景。太赫兹波频带较宽，由香农信道容量公式知太赫兹通信将会具有更大的信号传输带宽。国际通信联盟已指定下一代地面无线通信的频段为 0.12THz 至 0.22THz，太赫兹技术将成为未来 6G 通信的关键。

传统的耿式二极管多以 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。

基于转移的电子效应的基于气体和 INP 的 GUNN 二极管已成功用于微波和毫米波信号的产生。对 GAN 的 Fundamental 特性的研究表明，它也表现出转移的电子效应。使用宽带半导体（例如 GAN）具有提高的电强度的使用，可以提高半导体设备的频率和功率能力。

因此，为应对将来太赫兹通讯时代的到来，市场对于更高性能的高频段耿式二极管有了更大的需求，而基于 GaN 的耿式二极管恰能从其中脱颖而出。

## 二、 耿式二极管工作原理

### 1. 从耿式效应到耿式二极管

当电压施加在耿式二极管的两端时，中央薄层处的电梯度（electrical gradients，类似电化学梯度）最大。由于在导体材料中，电流与电压成正比，导电性将会产生。最终，中央薄层处会产生较高的电场值，从而得到较高的电阻，阻止导电性的进一步增加，电流会开始下降。这意味着耿式二极管具有负阻（Negative resistance）效应，或称负微分电阻（Negative differential resistance）。

从微观上来看耿式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，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。

利用负微分电阻性质与中间层的时间特性，可以让直流电流通过耿式二极管，从而形成一个弛豫振荡器（Relaxation oscillator）。在效果上，耿式二极管中的负微分电阻会抵消的部分真实存在的正阻值，这样就可以使电路等效成一个“零电阻”的电路，从而获得无穷振荡。振荡频率部分取决于耿式二极管的中间层，不过也可以通过改变其他外部因素来改变振荡频率。耿式二极管被用来构造 10 GHz 或更高（例如太赫兹级别）的频率范围，这时共振腔常被用来控制频率。共振腔可以是波导等形式。频率以机械进行调谐（如通过改变共振腔的参数）。

我们就以传统的 GaAs 耿式二极管为例。在耿式二极管中，有 3 个主要区域，称为顶部、底部和中间区域。构造制造这种二极管的一般方法是在退化的  $n^+$  衬底上生长和外延层。有源层的厚度范围从几微米到 100 微米，该层的掺杂水平范围从  $10^{14}cm^{-3}$  到  $10^{16}cm^{-3}$ 。但是这种掺杂水平非常低，用于器件的顶部和底部区域。根据所需的频率，厚度会发生变化。 $n^+$  层的沉积可以外延完成，否则通过离子注入掺杂。该器件的顶部和底部区域都被深度掺杂以提供  $n^+$  材料。这提供了与器件的连接所需的必要的高导电区域。通常，这些器件放置在进行导线连接的导电支撑件上。这种支撑也可以像散热片一样工作，散热很危险。二极管的另一个端子连接可以通过沉积在顶峰表面上的金连接来实现。由于其高导电性和相对稳定性，金连接在这里

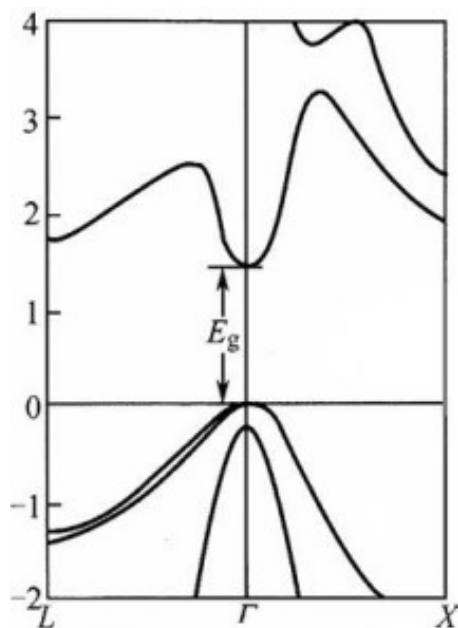


Figure 1: 耿式原理

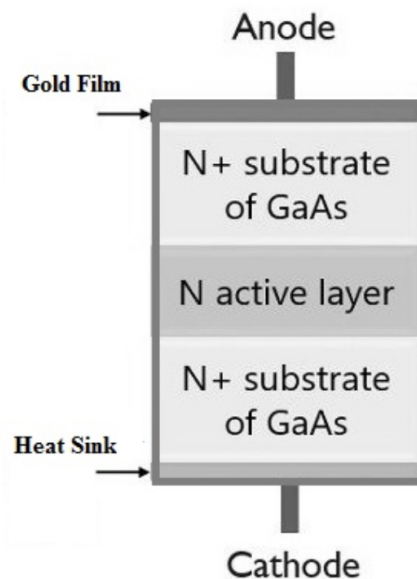


Figure 2: 耿式二极管

是必要的。在制造时，材料器件应该是无缺陷的并且还包括非常一致的掺杂范围。耿氏二极管的工作耿氏二极管的工作原理主要取决于耿氏效应。在某些材料中，例如 InP 和 GaAs，一旦通过材料内的电场达到阈值水平，电子迁移率将同时降低。当电场增强时会产生负电阻。当 GaAs 材料的电场强度在负极上达到其显著值时，就会形成低电子迁移率区。该区域以平均电子速度移动到 +Ve 电极。耿氏二极管在其 CV 特性上包括一个负电阻区域。一旦通过负 GaAs 电极获得显著值，那么就会有一个通过低电子迁移率的区域。之后，它将转移到正极。一旦它通过负极上的正极遇到强电场域，那么电子迁移率较低以及高电场的环状区域将开始重新产生。这一事件的周期性产生了 100 GHz 频率的振荡。一旦超过该值，振荡将开始迅速消失。特性耿氏二极管特性在其 VI 特性曲线上显示出负电阻区域，如下所示。

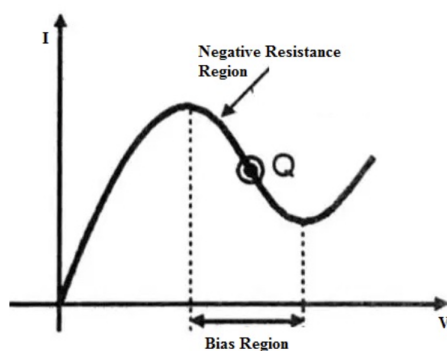


Figure 3: 耿式二极管特性曲线

## 2. 耿式二极管结构原理

耿氏二极管要应用于电路，需要外加电极。但是电极不是所示简单地与管芯区相连。

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。

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  $n$ ，电势梯度大，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，因此可以用一个负电阻与电容并联表示，畴区之外可以用正电阻与电容并联表示。

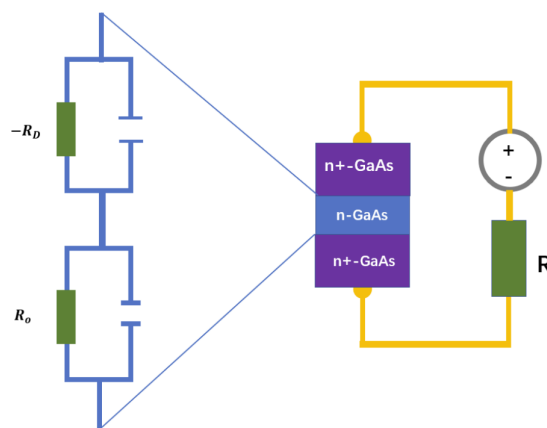


Figure 4: 耿式二极管原理图

### 三、 GaN 耿式二极管设计

#### 1. 总体设计考虑

耿氏器件的振荡频率与空间电荷层传输速度成正比，可以用饱和速度来近似。很明显，GaN 具有饱和速度，比 InP 中的相应速度高两倍，具有比 InP（或 GaAs）耿氏器件高得多的频率运行的潜力。GaN 具有吸引力的其他特性包括更高的热导率和更高的击穿电场。目前，在耿氏二极管中使用 GaN 的可行性研究仅限于一些初步的理论工作和一些初步的实验工作。然而，在实现耿氏二极管及其高功率方面发挥关键作用的问题，如阴极附近存在缺口、反向注入、阴极附近的异质结构等，在材料专用于太阳能电池之前需要进行严格的讨论。耿氏二极管的制造。因此，现阶段有必要进行详细、系统的研究，以认识 GaN 及其化合物在毫米波和太赫兹频率范围内用作耿氏二极管的潜力。

而在设计过程中，我们将充分发挥 GaN 材料带来的优势，提高其在高频段的功率，同时注重生产安全及环境保护，最后在保障高性能的同时降低生产成本，使其能够产生更大的经济效益。

#### 2. 参数设计及说明

当高电场  $F > F_{th}$  施加到体氮化镓上时，电子会出现负的微分迁移率 (UNDR)。在这些条件下，电子浓度的不均匀性会以  $I/t_{DDR}$  的速率增长，预计畴增长至少会持续  $3*t_{DDR}$ 。因此，如果  $N*L > 3*\epsilon_{PEAK}/q\mu_{NDR}$ ，掺杂  $N$  和厚度  $L$  的电子器件中就可能出现贡恩畴不稳定性。我们利用氮化镓和砷化镓的材料参数计算了它们的  $N*L$  乘积临界值，结果汇总于表。结果表明，由于峰值速度较高和负迁移率较小，氮化镓的  $N*L$  约为砷化镓的 80 倍。

材料	GaAs	GaN
$N^*L [cm^{-2}]$	$1 \times 10^{10}$	$8.2 \times 10^{12}$
$N_{CRIT}[cm^{-2}]$	$3.4 \times 10^{15}$	$4.3 \times 10^{18}$

W-band 的 N 型参杂有源层的参杂浓度为  $4 \times 10^{22}cm^{-3}$ ，厚度为 2 $\mu m$ 。D-band 的厚度为 2 $\mu m$ ，参杂浓度在  $5 \times 10^{22}cm^{-3}$  至  $8 \times 10^{23}cm^{-3}$  之间。阳极层和阴极层的厚度均为 1 $\mu m$ ，参杂浓度为  $2 \times 10^{23}cm^{-3}$ 。

### 3. 制备工艺

第一步：采用 MOCVD 的方法，在 N+ 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，在 SiC 上直接生长氮化镓，在 SiC 和氮化镓之间会有很大的应力存在，这样会导致氮化镓材料中存在很大的位错密度。器件参数按上表给出的，一般生长一层厚度约为 30nm 50nm 的 AlN 即可。对于衬底材料的选择，现在更加趋向于 SiC。这是因为太赫兹频段的氮化镓耿氏器件直流/交流功率转换效率非常低，模拟仿真显示最佳的 DC/AC 转换效率也仅仅达到 1%，这意味着器件必须保证很好的散热特性，否则器件内部自热效应就会占主导地位，从而抑制了耿氏器件负阻效应的作用，这个问题直到现在还是困扰人们的一个主要因素。因此按照当前的材料和器件工艺技术水平，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。

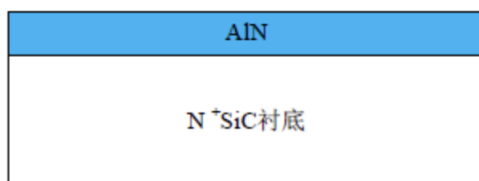


Figure 5: 第一步

第二步：采用 MOCVD 的方法外延生长一层 N+ 氮化镓，厚度约为 0.5 $\mu m$ 。这一层用作欧姆接触层。

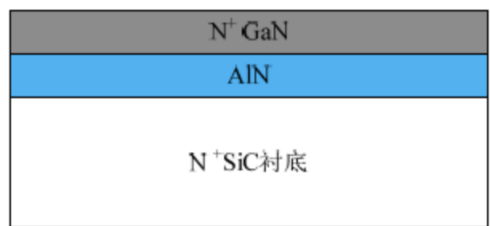


Figure 6: 第二步

第三步：采用 MOCVD 的方法外延生长一层 N-氮化镓。这一层用作器件的渡越层。

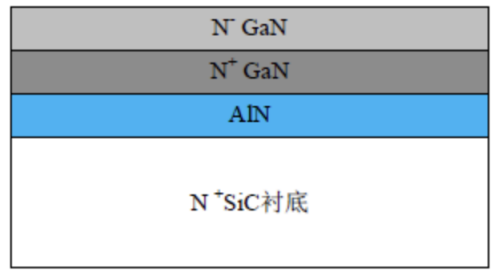


Figure 7: 第三步

第四步：采用 MOCVD 的方法外延生长一层 N-氮化镓。这一层用作器件的 Notch 层。

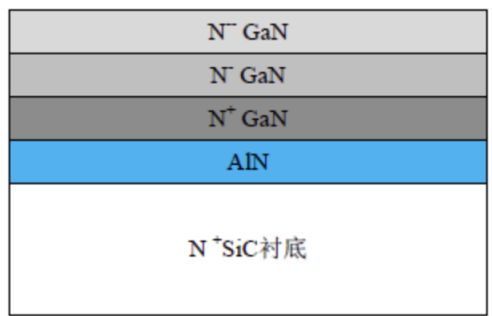


Figure 8: 第四步

第五步：采用 MOCVD 的方法外延生长一层的 N+ 氮化镓，这一层用作器件的欧姆接触层。

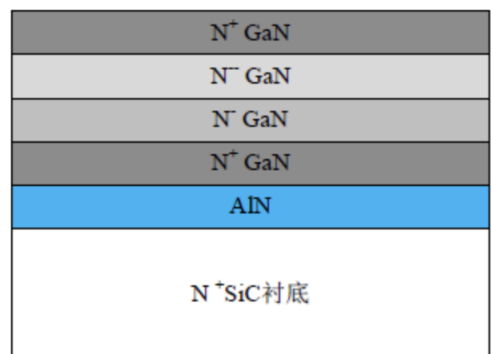


Figure 9: 第五步

第六步：采用 RIE 刻蚀形成大圆形台面，刻蚀深度至 SiC 衬底。



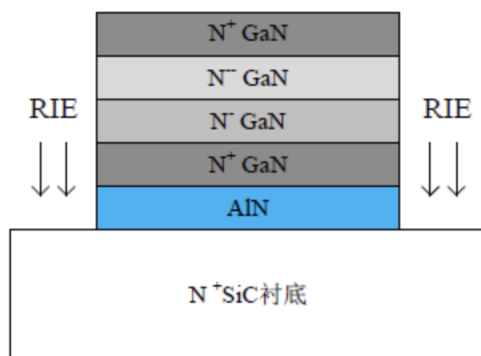


Figure 10: 第六步

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，即耿氏二极管的阳极。

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。

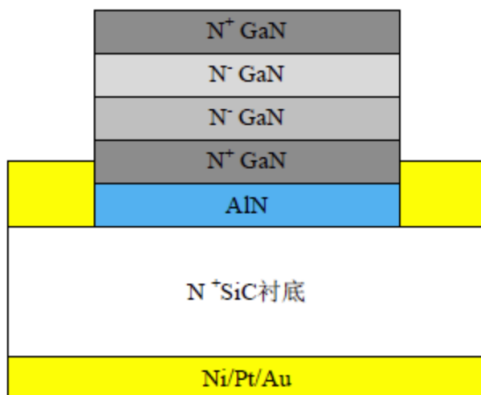


Figure 11: 第七步

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。

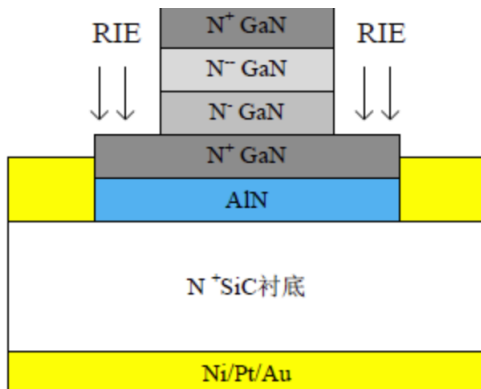


Figure 12: 第九步

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极管的阴极，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。

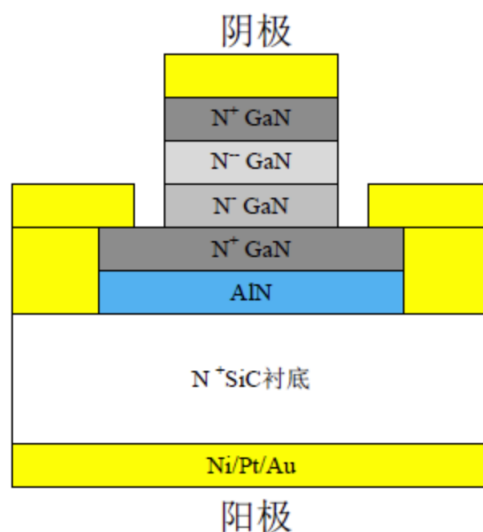


Figure 13: 最终结构

#### 4. 设计结果分析

通过以上的设计，可以得到其各项结果。Gunn 二极管的掺杂曲线如图所示。选择了不同的活性区域浓度以及优化的掺杂浓度以及优化的阳极和阴极宽度的阳极和阴极的浓度。从上述方法可以看出，随着时间的密度变化本质上是周期性的。

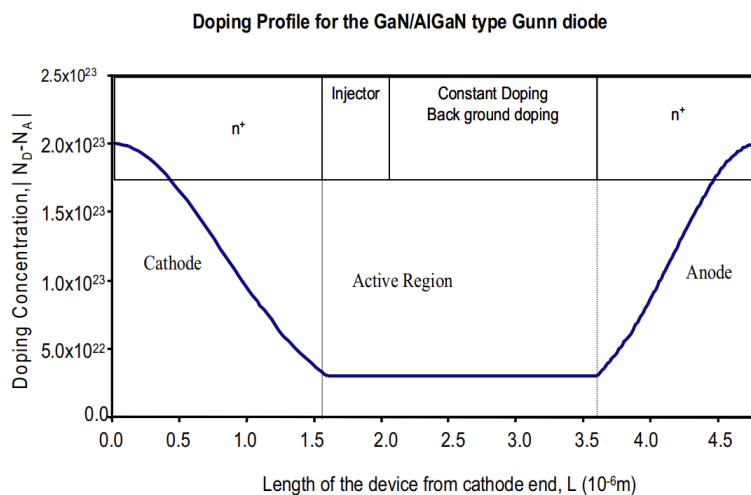


Figure 14: 掺杂浓度

对于基于 GaN 的 Gunn 二极管的不同应用偏置电压，电流密度相对于时间及其周期重复的变化如图所示。从图中可以发现，二极管在 100 至 120GHz 之间工作，直流偏置的变化。但是，在基于 GaAs 的 Gunn 二极管中，在相同的操作条件下运行的频率为 10-18GHz。在基于 GaN 的 Gunn 二极管的情况下，高工作频率主要用于高饱和载体速度。GaAs 的电流密度的峰值约为 10 ka/cm<sup>2</sup>，而 GaN 为 130 ka/cm<sup>2</sup>，这表明了 GaN 耿式二极管有更高的强度。

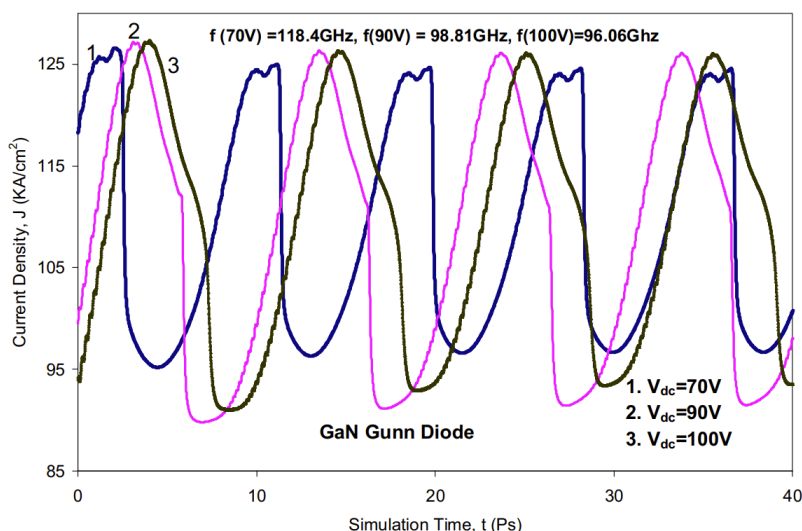


Figure 15: 电流密度随时间变化关系

对上述信号进行傅立叶分析，以确定耿式管产生的功率。GaAs 耿式二极管在不同的直流电压下产生的功率如图所示，获得的结果和功率与先前获得的结果匹配，并且与实验结果密切一致。它表明，随着直流电压的增加，产生的功率增加。此外，对于特定频率，获得的功率是最大的（在这种情况下，DC 偏置为 4.0V）。因此，对于特定的工作频率，获得了固定的直流值。在这种情况下，对于 50μm 半径的 GAAS 耿式二极管，在这种情况下获得的功率在 90GHz 时为 100MW。这表明基于 GaAs 的 Gunn 二极管在 W-Band 产生的功率约为 100MW。

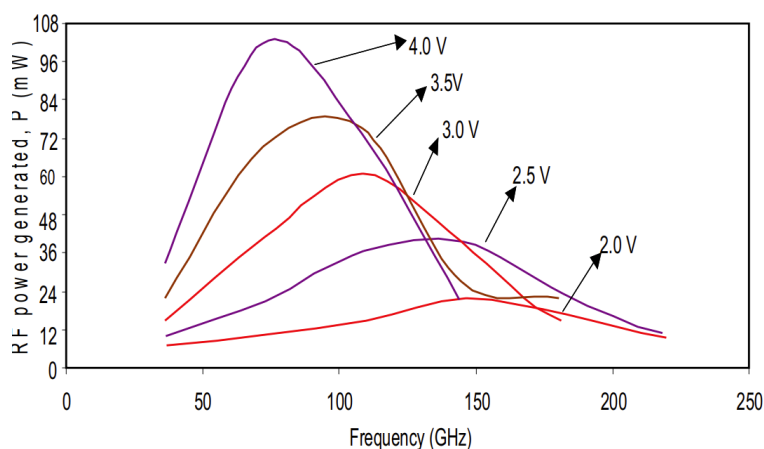


Figure 16: GaAs 耿式管 RF 功率

不同直流偏置电压下 GaN 耿式二极管产生的功率如图所示。在这种情况下，直流偏置电压从 70V 变化

到 100V。随着施加电压的增加，功率会增加，并最终趋于一定值。假设有  $50\mu\text{m}$  半径的设备，产生的功率约为 25W，比基于 GaAs 的 GUNN 二极管在相同的操作条件下高 250 倍。因此，基于 GAN 的 Gunn 二极管比在相同的操作条件下基于 GAAS 的 GUNN 二极管具有更大的潜力。

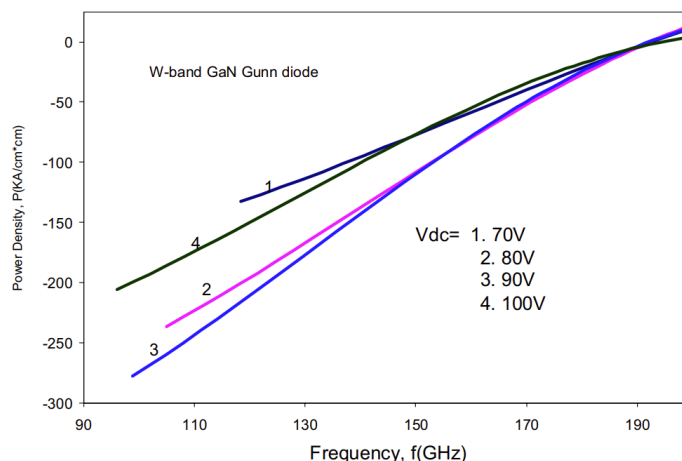


Figure 17: GaN 耿式管 RF 功率

## 5. GaN 耿式二极管的优势

GaN 材料的研究与应用是目前全球半导体研究的前沿和热点，是研制微电子器件、光电子器件的新型半导体材料，并与 SiC、金刚石等半导体材料一起，被誉为是继第一代 Ge、Si 半导体材料、第二代 GaAs、InP 化合物半导体材料之后的第三代半导体材料。它具有宽的直接带隙、强的原子键、高的热导率、化学稳定性好（几乎不被任何酸腐蚀）等性质和强的抗辐照能力，在光电子、高温大功率器件和高频微波器件应用方面有着广阔的前景。

根据以上的设计及结果，我们不难看出 GaN 耿式二极管相较于其他有更多的优势。

- （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；
- （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）高工作频率：GaN 耿式二极管可以在高达数 GHz 的频率下工作，这使得它们非常适合用于高速开关和放大器应用；
- （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）噪声低：GaN 耿式二极管的噪声比其他半导体器件更低，这使得它们非常适合用于高灵敏度应用；
- （6）电源电压低：GaN 耿式二极管的电源电压比其他半导体器件更低，这使得它们非常适合用于低功耗应用；

## 四、对环境及社会的影响

在生产过程中，我们应充分考虑其对环境及人的影响，传统的 GaAs 工艺中，原材料对于人体有着很强的毒害作用，因此生产过程中，容易发生中毒等危险事件。而在使用 GaN 工艺之后，能够极大地降低中毒概率的发生，进一步保障人员安全。

同时，在环境保护上，含有 GaAs 耿式二极管的器件如果被消费者遗弃，并未经过合格的处理之后，会对环境造成极大的破坏，而 GaN 材料对于环境的影响要远小于 GaAs，所以使用 GaN 耿式二极管在高温之

下就可以分解，相对处理起来更加容易，会更有利于环境保护，同时处理的成本较低，更能被市场及消费者所认可。

从整个社会的 GaN 产业链来看，已有多种成熟的技术可以用来生产氮化镓，市场上主流的 GaN 外延片供应商包括日本 NTTAT，其可以提供用于大功率集成电路及高频率通信领域的高品质氮化镓外延片；比利时公司 EpiGaN 可提供 4、6 英寸氮化镓外延晶圆，广泛用于 5G 通讯、高效电力电子、射频功率、传感器等领域，目前公司已经率先实现了 8 英寸硅基氮化镓晶圆量产，生产工艺处于行业先进水平。国内厂商包括晶湛半导体、苏州能华以及华功半导体等，其中晶湛已经建成了年产 1 万片 6 英寸氮化镓外延片生产线，在全球拥有超过 150 家著名半导体客户，技术实力已经向国际领先水平靠近。因此该工艺对国外的依赖较小，能够有效地降低成本，实现更高地经济效益。

## References

- [1] Takayuki Tanaka and Masayoshi Aikawa. A Novel K-band Push-Push Oscillator Using Gunn Diodes. Department of Department of Electrical Electronic Engineering, Saga University 1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502, JAPAN
- [2] Egor Alekseev and Dimitris Pavlidis. GaN GUNN DIODES FOR THz SIGNAL GENERATION, Solid State Electronics Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Michigan, 1301 Beal Ave, Ann Arbor, MI 48109-2122, USA
- [3] A K Panda, Member IEEE , N C Agrawal, R K Parida, G N Dash, Senior Member IEEE . GaN-based Gunn Diode for High Frequency Signal Generation.