

浙江大學
ZHEJIANG UNIVERSITY



信息电子学物理基础
耿式二极管的初步设计

姓 名 _____

学 号 _____

学 院 _____ 信息与工程学院

指导老师 _____ 汪小知

耿式二极管的初步设计

摘 要 太赫兹技术 (Terahertz Technology) 是指利用频率在 0.1 到 10 太赫兹 (THz) 之间的电磁波进行研究和应用的技术。太赫兹波位于微波和红外光之间, 具有独特的性质, 使其在多个领域展现出广阔的应用前景。而耿氏二极管是太赫兹振荡源不可或缺的核心器件之一, 利用微分负阻效应产生高频振荡, 是一种高效、可靠、可控的太赫兹源。

本文基于对 GaN 与其他材料的物理参数比较, 选择用 GaN 制备耿式二极管, 并在引入 notch 层的基础上, 创新性地提出了用 AlGaIn 来替代 GaN 的 notch 层方法, 进一步减少“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。最终给出了一个振荡频率在 600GHz 的 AlGaIn 作为 notch 层的耿式二极管的设计方案, 并对其进行了设计与环境上的综合评估。

关键词 太赫兹; 耿式二极管; AlGaIn

目录

1	设计背景	1
2	设计原理	1
2.1	耿式效应	1
2.2	耿式二极管	2
3	GaN 耿式二极管设计	3
3.1	材料选择	3
3.2	GaN 耿式二极管设计	4
3.3	总体结构设计	5
4	生产与环境评估	7

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。

2 设计原理

2.1 耿式效应

耿氏效应 (Gunn Effect), 也称为耿氏振荡, 是一种在半导体材料中观察到的现象, 这个效应是由美国物理学家 J.B. Gunn 在 1963 年首次发现的, 因此得名。它的主要表现是当一个高电场施加在某些半导体材料上时, 电子在材料中的运动速度会达到一个临界值, 导致电子的迁移率 (电子在电场作用下的移动速度) 突然下降。在宏观上表现出电阻为负, 如 Fig1(a) 所示, 这种效应叫做微分负阻效应。这种现象会导致电流的不稳定性, 进而引发振荡。

在阴极附近形成一个偶极层, 称为高场畴, 它所形成的场与外场方向相同。层内相对于层外, 电场增强。层的左方和右方区域为低场区分别处于 E_C 和 E_B 。高场畴稳定情况下, 器件内的电场如图 Fig1(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。

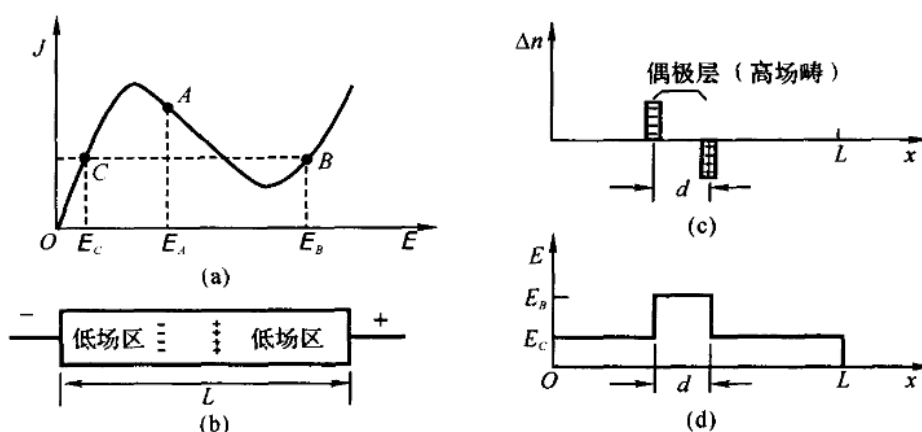


Fig. 1 GaAs 耿氏效应:(a) J E 关系 (b) 偏置在 E 时形成的高场畴 (c) 电子浓度分布 (d) 偶极层中电场

而要探究其微观原理, 可以从 GaAs 的能带结构入手, 如 Fig2 所示, GaAs 导带具有双能谷, 分别为

中心谷和卫星谷。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。

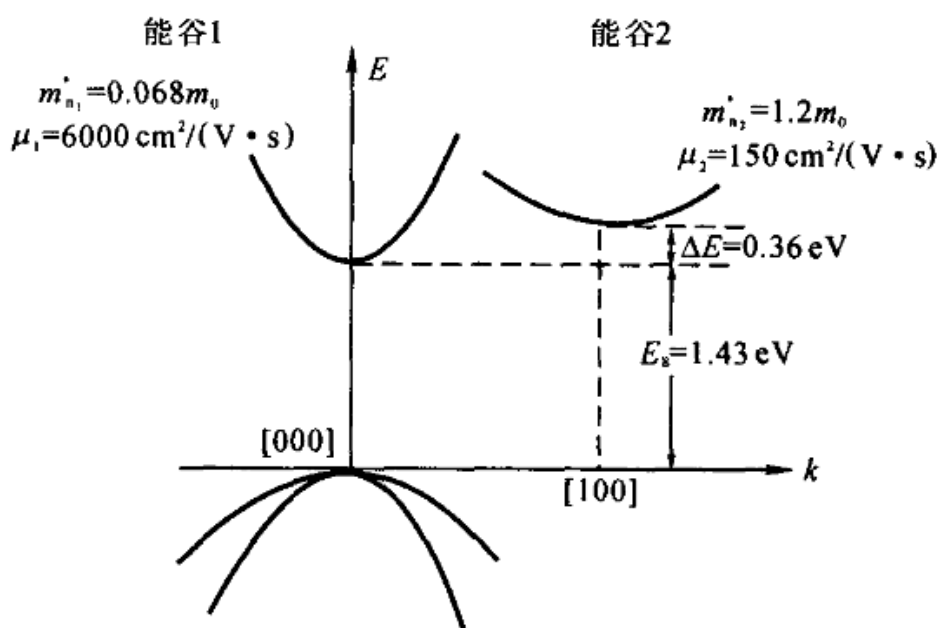


Fig. 2 GaAs 能带结构

2.2 耿式二极管

耿式二极管当然是基于耿式效应的一种器件，利用这一效应产生高频振荡，核心部分是 N 型半导体材料，如 GaAs, GaN, InP, InGaAs 等，包含阳极和阴极，用于施加电压和收集电流。如下给出了传统的 GaN 耿式二极管的结构电路。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。但是这种结构在应用中仍存在一定问题，后面给出了我们的解决方案。

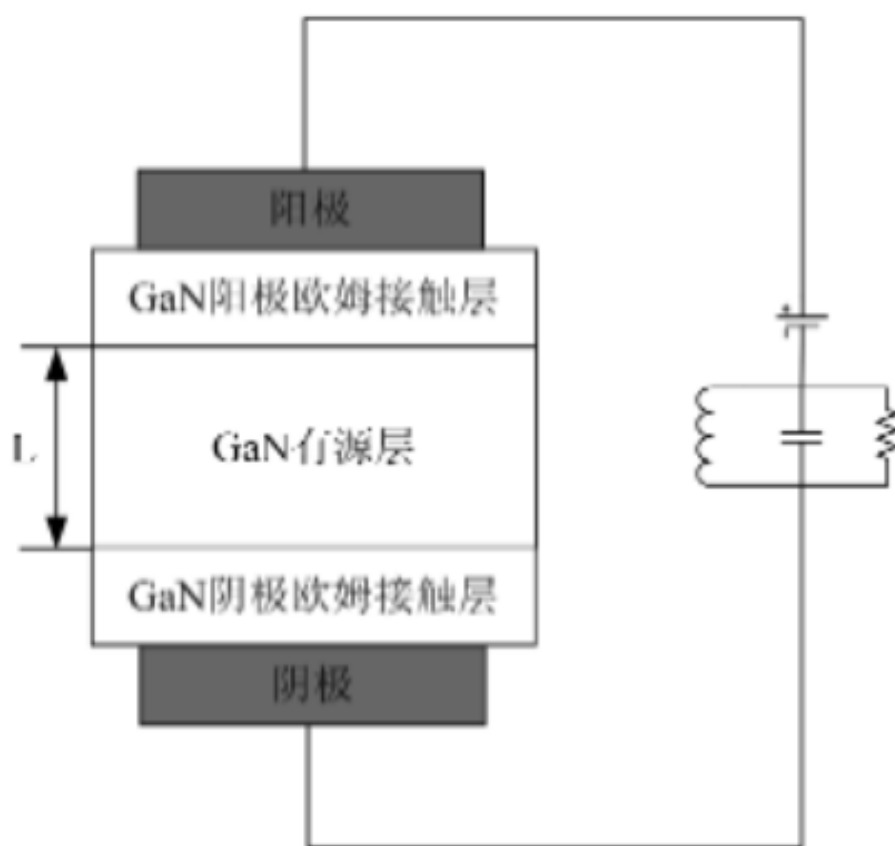


Fig. 3 GaN 耿式二极管偏置电路

3 GaN 耿式二极管设计

3.1 材料选择

传统的耿式二极管使用 GaAs 制备,但是 GaAs 耿氏二极管的电子谷间转移速率限制了其振荡频率,当振荡频率超过 100GHz 时,输出功率将会急剧下降,这也就意味着 GaAs 耿氏二极管不能满足太赫兹源的应用需求。^[1] 因此,近年来,人们开始寻找其他材料制备耿式二极管,我们这里选取了 GaN,它相比其他材料具有如下优势,并列出了其相对其他材料的物理参数优势

- (1) 禁带宽度宽: GaN 的禁带宽度为 3.4 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.

参数	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
禁带宽度 (eV)	1.12	1.42	3.25	3.45
电子饱和速度 (10^7 cm/s)	1.0	2.0	2.0	2.7
电子迁移率($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1400	8500	1020	1000
相对介电常数	11.4	13.1	9.7	8.9
击穿场强 (MV/cm)	0.3	0.4	3.0	3.3
热导率	1.5	0.5	4.9	2.0
Baliga 优值(高频)	1	11	73	180
Baliga 优值(低频)	1	16	600	1450

Fig. 4 半导体材料物理参数对比^[2]

3.2 GaN 耿式二极管设计

对于有源区的设计,实际上是要确定振荡频率,有源区长度,掺杂浓度等参数,以形成稳定振荡.

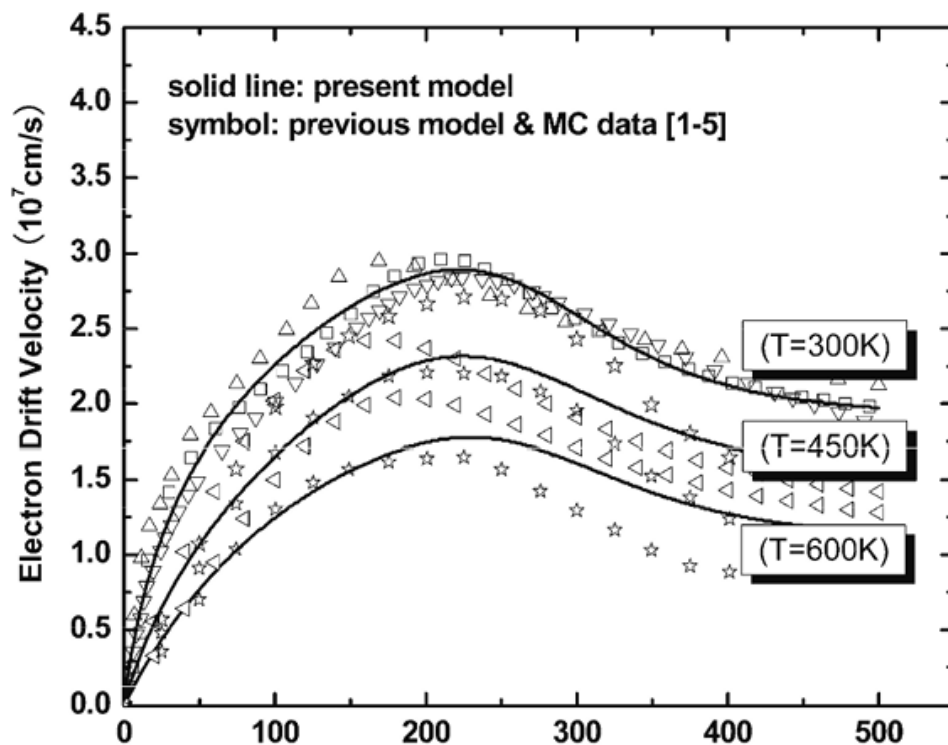


Fig. 5 不同温度下 GaN 速场关系图

我们知道,由于器件的渡越时间必须大于介电弛豫时间才可以有稳定的振荡,可以得到:

$$nL \geq \frac{3\varepsilon v_{peak}}{\varepsilon \mu_d}$$

根据查阅的资料,针对 GaN, 需要有 $nL > 5.3 \sim 8.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ^[3] 根据 $f \approx \frac{v_d}{L}$ 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 。但是掺杂浓度 n 实际存在上限, 也即不能超过某个阈值, 经计算

$$n < 2.8 - 4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

因此在设计上存在一个平衡的选择, 我们选择了 $E = 400 \text{ kV/cm}$, 在温度为 300 K 时经速场关系可以获得畴区移动速度

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

为了使得该器件能够在太赫兹频段工作, 我们选取 600 GHz 作为工作频率, 经计算得出

$$L = 0.4 \mu\text{m}$$

选取掺杂浓度为

$$n = 1.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

经检验符合上述 nL 的合理范围. 计算其工作电压约为

$$V \approx \frac{E}{L} = 100 \text{ V}$$

因此最终给出 GaN 耿式二极管的设计参数如下:

工作电场 E	饱和移动速度 v_d	有源区长度 L	振荡频率 f	掺杂浓度 n	工作电压 V
400 kV/cm	$2 \times 10^7 \text{ cm/s}$	$0.4 \mu\text{m}$	600 GHz	$1.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 V

Table 1 GaN 耿式二极管设计参数

3.3 总体结构设计

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, 由 $f \approx \frac{v_d}{L}$ 可知, 降低了器件的最高振荡频率。

传统解决方法是在在阴极欧姆接触层与有源区之间加入低掺杂 GaN notch 掺杂层, 可以降低电子渡越层中电场峰值, 使得电子渡越层内的电场分布更加平坦, 从而可以明显缩短死区长度。但是在实际的制造过程中, 由于没有引入有效的位错过滤机制, 使得大量位错延伸到器件的电子渡越层, 导致该层的体材料位错浓度过高, 从而影响器件的电特性。^[4]

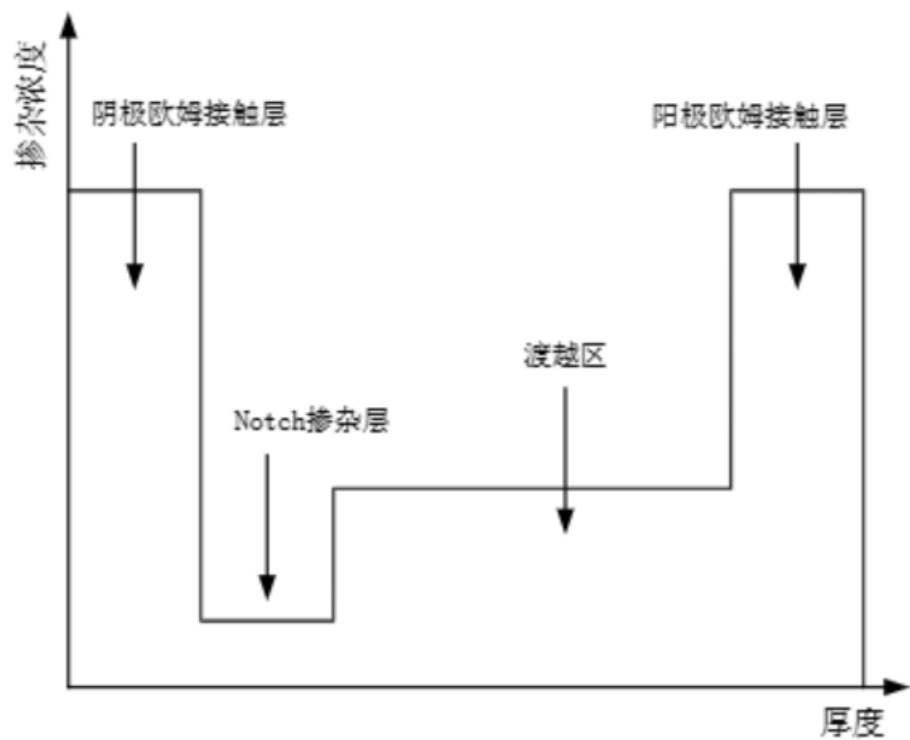


Fig. 6 添加了 GaN notch 掺杂层的传统 GaN 耿式二极管结构

为了针对性地解决这个问题, 我们提出了 **AlGa_N** 来代替 **GaN** 作为 **Notch** 层, 该层处于阴极欧姆接触区与渡越区之间. 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** 这一层发射到渡越层, 所以称该层为电子发射层. 器件结构设计及结构参数设计如下.

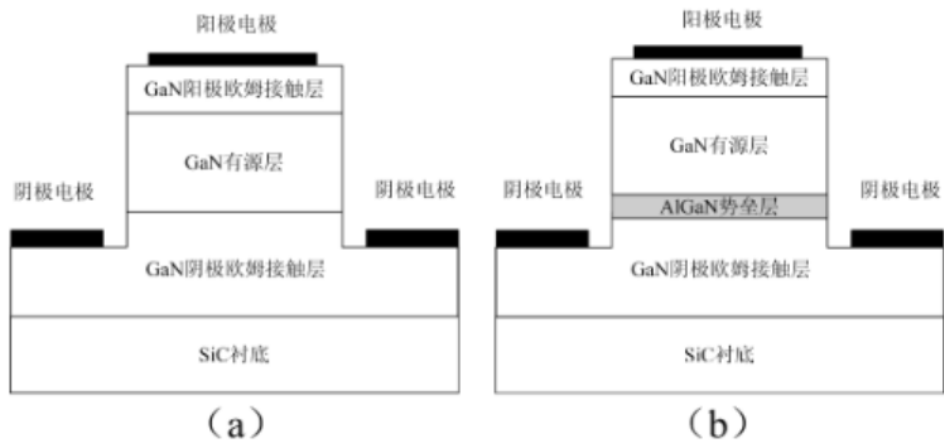


Fig. 7 (a) 传统 GaN 耿式二极管结构 (b) 引入 AlGa_N 的改进耿式二极管结构

各层名称	n+ GaN 阴极欧姆接触层	AlGaIn 发射层	GaN 渡越层	n+ GaN 阴极欧姆接触层
厚度 (nm)	1500	150	400	50
掺杂浓度 (cm^{-3})	5×10^{18}	4.5×10^{16}	1.6×10^{17}	5×10^{18}

Table 2 引入 AlGaIn 的改进耿式二极管结构参数

4 生产与环境评估

相比于 GaAs, 采用 GaN 生产耿式二极管在环境方面有较大的优势, 如在生产过程中, 制备 GaAs 可能需要使用有毒化学品, 如砷化氢 (AsH_3), 这是一种剧毒气体, 处理不当会对环境造成严重污染。而 GaN 生产过程中使用的化学品相对较少, 且毒性较低, 如氨气 (NH_3), 虽然也有一定的毒性, 但处理和相对容易。此外, GaAs 的废弃物处理也需要非常谨慎, 以防止砷元素渗入土壤和水源, 造成环境污染。而 GaN 在处理时对人体和环境都更为友好。

尽管氮化镓在环境安全方面具有优势, 但为了确保整个生产过程的安全性和可持续性, 仍然需要采取一系列严格的管理措施和预防措施。通过制定严格的规章制度、操作规范和事故处理预案, 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, 处理好半导体材料废弃物排污与环保工作, 持续进行工业卫生监控, 可以确保操作人员的健康和安全, 保护环境, 实现可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 李亮, 张瑾, 张俊. 一种应用于太赫兹频段的 AlGaIn/GaN 耿氏二极管研究[C]//2015 年全国微波毫米波会议论文集. 扬州海科电子科技有限公司; 中船重工第 723 研究所;, 2015: 1363-1366.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 许详. GaN 基太赫兹耿氏二极管新结构研究[D]. 西安电子科技大学, 2015.