

致谢 Qorvo

氮化镓 射频技术

FOR
DUMMIES[®]

您将了解：

- 氮化镓的关键属性
- 氮化镓场效应管的独特之处
- 氮化镓技术与其他半导体技术的比较
- 氮化镓的热设计挑战

安德鲁·摩尔
何塞·希曼尼斯



关于 Qorvo

Qorvo (Nasdaq: QRVO) 是面向移动、基础设施和航天航空/国防应用提供核心技术与射频解决方案的领先供应商。在RFMD与TriQuint合并之后，Qorvo组建而成并在全球拥有6000多名员工，他们致力于为实现全球互联的各种应用提供解决方案。Qorvo拥有业内最广泛的产品组合和核心技术；还有通过ISO9001、ISO 14001和ISO/TS 16949认证的世界级生产厂；也是面向砷化镓 (GaAs)、氮化镓 (GaN)、体声波 (BAW) 产品与服务并经过美国国防部 (DoD) 认可的“可信任供应商”（1A级）。如欲了解该行业领先的核心射频解决方案，敬请访问:<http://www.qorvo.com>。



氮化镓射频技术

FOR
DUMMIES[®]

Qorvo 专版

**安德鲁·摩尔
何塞·希曼尼斯**

WILEY

氮化镓射频技术, For Dummies® Qorvo 专版

出版商

约翰•威利父子公司

111 River St.

Hoboken, NJ 07030-5774

www.wiley.com

新泽西州霍博肯市约翰•威利父子公司版权所有© 2015

非经出版商事先书面准许,不得以电子、机械、复印、录制、扫描等形式或方式复制、保存于检索系统或传送本出版物的任何部分,但根据《1976 年美国版权法》第 107 条或 108 条规定准许的情况除外。需要办理准许的,应将申请发送至: Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 地址: 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, 电话: (201) 748-6011, 传真: (201) 748-6008, 也可在线提交, 网址: <http://www.wiley.com/go/permissions>。

以下商标: Wiley、For Dummies、Dummies Man、The Dummies Way、Dummies.com、Making Everything Easier 以及相关商业外观均为约翰•威利父子公司和/或其在美国和其他国家关联机构的商标或注册商标,未经书面准许,不得使用。约翰•威利父子公司与书中提及的任何产品或销售商之间不存在任何关系。Qorvo 和 Qorvo 标识以及相关商业外观均为 Qorvo 半导体公司和/或其在美国和其他国家关联机构的商标或注册商标,未经书面准许,不得使用。

所有其他商标也分别归属于各自所有者。

责任限制/保证内容免责声明: QORVO 半导体公司、出版商和作者没有对本书内容的准确性或完整性做出任何声明或保证,并且特别声明拒绝承认一切保证内容,包括但不限于对特定用途的适合性保证。不得因为销售或促销资料而形成或扩展任何保证内容。书中的建议和策略不可能适合每种情况。本书在销售时,即已理解 QORVO 和出版商均不提供任何法律、会计或其他专业服务。如需专业服务,应当咨询有资格的专业人士。无论 QORVO、出版商还是作者,对本书所产生的任何损害均不承担任何赔偿责任。本书提及某个组织或网站作为引证和/或潜在的补充信息来源的,这种情况并不表明作者或出版商认可该组织或网站所提供的信息或建议。此外,读者应当认识到,在作品成书与读者读到这段期间,书中出现的网站可能已经变更或不复存在。

ISBN 978-1-119-13553-1 (pbk); ISBN 978-1-119-13554-8 (ebk)

美国制造

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

关于我们其他产品和服务的一般信息,或者如何为您的企业或组织定制傻瓜版书籍,请联系我们在美国的业务发展部,电话: 877-409-4177, 电子邮件: info@dummies.biz, 网址: www.wiley.com/go/custompub。关于如何为产品或服务申请“傻瓜版”品牌许可,请联系: BrandedRights&Licenses@Wiley.com。

出版商鸣谢

为本书上市做出贡献的部分人员有:

开发编辑: 伊丽莎白•库伯尔

项目编辑: 伊丽莎白•库伯尔

购置编辑: 凯蒂•摩尔

编辑经理: 莱夫•门格勒

业务开发代表: 卡伦•哈坦

定制出版项目专员: 米高•沙利文

项目协调: 美利沙•科塞尔

特别帮助: 詹尼弗•宾汉姆

道格拉斯•李普

坎迪斯•克里斯坦森

引言

氮

化镓晶体管首次出现在 20 世纪 90 年代,现在已经广泛用于商业和国防领域。氮化镓的普及在于其高电流和高电压性能,这使其在微波应用和功率切换上极具价值。

Qorvo 是氮化镓晶体管射频应用及其底层工艺技术开发的领导企业。该公司研发的最新器件支持低噪应用,以及高频应用和 200 瓦以上功率级别应用。

Qorvo 提供离散式氮化镓晶体管、单片微波集成电路和封装解决方案,支持应用广泛,包括新一代雷达、电子战、基站、仪表和有线电视等基础设施。

氮化镓技术在性能上优于其他射频技术,这是因为在给定频率下,氮化镓可以同时提供最高的功率、增益和效率组合,还因为氮化镓可在较高工作电压下工作,并且降低系统电流。在本书中,我们将向您介绍氮化镓半导体、氮化镓场效应管,以及在部署氮化镓半导体时的一些实际考虑因素。

傻瓜式假设

本书在编写上同时面向技术读者和非技术读者。如果您是执行人员、销售人员或设计工程人员,则本书适合您。不过,如果您想要一本关于家庭园艺的书,那就另当别论!

书中使用的符号

在本书中,我们偶尔会使用一些符号,以吸引读者注意一些重要信息。虽然不会看到可爱的笑脸或其他闪亮的表情,但您一定要停下来注意看!以下是您可能看到的内容。



这个符号指向的信息您需要保存到存储器或大脑里,或者其他记录生日或电话号码等以备后期使用的任何位置。



这个符号标识的任何内容都是面向您内在的技术癖好。谁知道呢?您可能会获得一些有用的知识,也可能增加书呆子气。



这可不是您要付给服务生的小费(英语里“Tip”既有“小提示、小窍门”的意思,也有“小费”的意思)。您应该停下看看,因为这里的知识可以减少后面的困难。

本书之外

虽然本书提供了很好的信息,但是 24 页的一本小册子只有这么多!所以,如果在读过之后,您觉得自己想要了解更多信息,只需访问 www.qorvo.com/gan,在那里您能更多了解 Qorvo 的氮化镓技术与产品。

阅读方式推荐

无论您是电气设计和氮化镓技术的新手,还是希望在设计中使用氮化镓技术的经验老道的设计工程师,您都将发现本书有所帮助。

本书各章自成一体,如果您喜欢,您可以跳读。如果您熟悉一章的论题,可以直接跳过。我们在本书的其他章节提供交叉索引,所以您总能找到自己想要的东西。

第1章

氮化镓综述

本章提要

- ▶ 初识氮化镓
- ▶ 了解氮化镓的独特之处
- ▶ 认识压电性
- ▶ 认识氮化镓的高功率密度优势

氮

化镓是一种二元 III/V 族直接带隙半导体晶体,也是一般照明(LED 灯)和蓝光播放器最常使用的材料。另外,氮化镓还被用于射频放大器和功率电子器件。氮化镓是非常坚硬的材料;其原子的化学键是高度离子化的氮化镓化学键,该化学键产生的能隙达到 3.4 电子伏特。



在半导体物理学中,“能隙”是指使电子游离原子核轨道,并且能够在固体内自由移动所需的能量。能隙是一个重要的物质参数,它最终决定了固体所能承受的游离电子和电场的能量。氮化镓的能隙是 3.4 电子伏,这是一个比较大的数字。这就是为何氮化镓被称为“大能隙半导体”的原因。相比之下,砷化镓的能隙为 1.4 电子伏,而硅的能隙只有 1.1 电子伏。

在本章中,我们将向您介绍氮化镓的基础知识,并且说明氮化镓具有的哪些特性使其成为射频功率放大器和其他高压高频应用的理想材料。

氮化镓基础知识

镓是一种化学元素,原子序数 31。镓并非自由存在于自然中。恰恰相反,镓是锌和铝生产过程中的一种副产品。

氮化镓复合物由镓和氮原子排列构成,最常见的是纤锌矿晶体结构。纤锌矿晶体结构(图 1-1)是一种六边形结构,其特征是有两个晶格常数(图中标记为 a 和 c)。

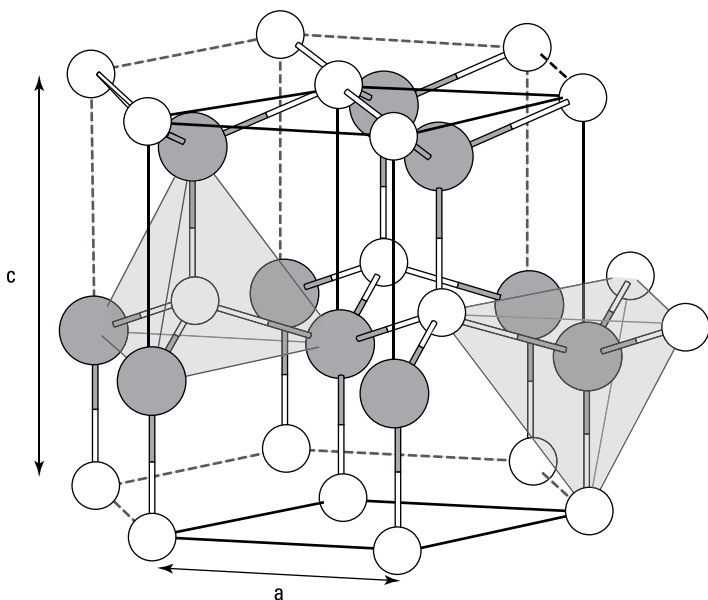


图 1-1: 氮化镓晶体结构

在半导体领域,通常在高温条件下(大约 1,100 摄氏度),在异质衬底上(对于射频应用,采用碳化硅作为衬底材料;对于功率电子器件应用,则采用硅作为衬底材料),利用金属有机化学蒸气沉积或分子束外延技术生长氮化镓。



碳化硅基氮化镓方法综合了氮化镓的高功率密度能力,以及碳化硅的超高导热性和低射频损耗。正是因为这一点,碳化硅基氮化镓方法才成为实现高功率密度射频性能的首选方法。今天,碳化硅基氮化镓的衬底直径可以达到 6 英寸。



硅基氮化镓组合的导热性能要差很多,并且射频损耗较高,但造价较为低廉。正是因为这一点,硅基氮化镓组合才成为低成本功率电子器件应用的首选方法。今天,硅基氮化镓的衬底直径可以达到8英寸。

在射频应用中,为何氮化镓的性能优于其他半导体材料

尽管与硅和砷化镓等其他半导体材料相比,氮化镓是相对较新的技术,但是对于远距离信号传送或高端功率级别等(例如,雷达、基站收发台、卫星通信、电子战等)高射频和高功率应用,氮化镓已经成为优先选择。



碳化硅基氮化镓在射频应用中脱颖而出的原因如下:

➤ **高击穿电场:**由于氮化镓拥有大能隙,因此氮化镓材料也拥有高击穿电场,所以氮化镓器件的工作电压可以远高于其他半导体器件。当受到足够高的电场影响时,半导体中的电子能够获得足够动能并脱离化学键(这一过程被称为“碰撞电离”或“电压击穿”)。如果碰撞电离没有得到控制,则能够造成器件性能退化。由于氮化镓能够在较高电压下工作,因此能够用于较高功率的应用。

➤ **高饱和速度:**氮化镓的电子拥有高饱和速度(非常高的电场下的电子速度)。当结合大电荷能力时,这意味着氮化镓器件能够提供高得多的电流密度。

射频功率输出是电压与电流摆幅的乘积,所以,电压越高,电流密度越大,在实际尺寸的晶体管中产生的射频功率越大。简单而言,氮化镓器件产生的功率密度要高得多。

➤ **突出的热属性:**碳化硅基氮化镓表现出不同一般的热属性,这主要因为碳化硅的高导热。具体而言,这意味着在功率相同的情况下,碳化硅基氮化镓器件的温度不会变得像砷化镓器件或硅器件那样高。器件温度越低才越可靠。



什么是压电性, 压电性为何重要

氮化镓有压电性。“压电”是个独出心裁的词,意思是在压力作用下产生的电能。



“压电”一词分别源自希腊语“piezein”(意思是“挤压”)和“electric”或“electron”(意思是“琥珀色”——古人认识的电荷)。

氮化镓有压电性,这是因为氮化镓的键是离子化的,还因为镓原子和氮原子的连续平面间距并不一致(参见图 1-2)。当我们挤压一个平面上的原子时,上方和下方平面的原子移动不同距离,形成净电荷、电场和电压。

现在,您知道了为何氮化镓有压电性,您可能感到奇怪:为何氮化镓的压电属性这么重要。氮化镓的压电性导致了氮化镓晶体管的电子沟道产生的部分电荷。压电性还造成了晶体管的部分退化模式(我们将在第 3 章深入讨论)。



我们常用的部分消费电子器件(例如,智能手机)每天都在使用压电属性。体声波和声表面波滤波器(Qorvo 生产的滤波器数量以百万计)使用的压电衬底是智能手机实现多频带功能的关键元件。

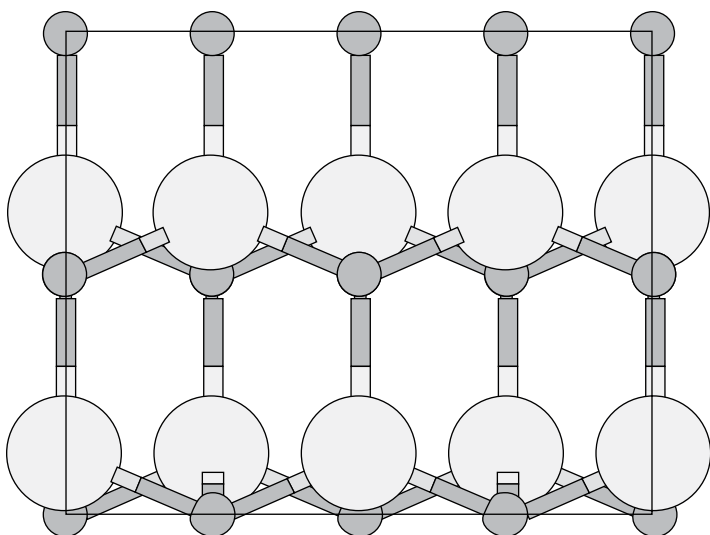


图 1-2: 氮化镓晶格平面视图。

氮化镓的高功率密度优势

如前所述,碳化硅基氮化镓是一种高射频频率密度的半导体。在场效应管中,功率密度通常单位是W/mm,这是因为功率与栅长而不是栅面积成一定比例。显然,如果功率密度较高,则意味着使用较少数量的器件就可获得较高的功率,所以在功率需求一定的情况下,可以缩小器件体积。

现在,器件体积的减小并不仅仅表示材料成本的降低。小尺寸器件还意味着:

- ✔ **降低电容:**电路设计人员能够设计带宽更宽的放大器。
- ✔ **减少组合损耗:**您可以获得更高的效率和增益,最终还将获得更高的功率。

今天的移动通信基础设施和高级军事系统(例如,相控阵雷达、通信和电子战)都需要高频率、高带宽、高功率和高效率的器件。这些应用也正是氮化镓能够脱颖而出的地方。

第2章

介绍氮化镓场效应管

本章提要

- ▶ 认识场效应管
- ▶ 了解氮化镓场效应管的几何结构
- ▶ 了解氮化镓场效应管的工艺
- ▶ 氮化镓场效应管与其他场效应管技术的对比
- ▶ 氮化镓场效应管高级几何结构

场

效应管是固态电子器件的中流砥柱，已经存在了几十年。在本章，我们将向您介绍如何把第 1 章讲到的氮化镓的优势（例如，高电流、高击穿电压以及突出的热属性）应用到场效应管，使氮化镓场效应管成为一个功能强大的器件。

场效应管的工作方式

场效应管是一种通常用于放大弱信号（例如，无线信号）的晶体管。

在场效应管中，电流沿着一个半导体通路流动，这个通路被称为“沟道”。位于沟道一端的电极被称为“源极”，位于沟道另一端的电极被称为“漏极”。通过向被称为“栅极”的控制电极施加电压，可以改变电流。栅极电压的较小变化，也可能造成从源极到漏极的电流发生较大改变。由于控制沟道所需的功率远低于晶体管供给负载的功率，因此场效应管可以放大射频信号。

场效应管有两种,其定义依据是栅极没有被施加电压时的沟道状态。增强型场效应管在栅极电压为零时,不在漏极和源极之间传导电流。耗尽型场效应管则在栅极电压为零时,形成完整沟道;只要源极和漏极之间存在电位差,电流就可在二者之间循行。几乎所有射频应用的氮化镓场效应管都是耗尽型场效应管。在功率电子器件中,为了制造真正的增强型场效应管,人们付出了大量努力。

场效应管可以使用很多半导体材料制造,硅是目前使用最普遍的材料。使用场效应管几何结构的其他半导体材料还有砷化镓、砷化铟镓、磷化铟,当然还有氮化镓。

a² + b² = c²: 氮化镓场效应管的几何结构

与砷化镓场效应管和硅基场效应管等其他技术相比,氮化镓场效应管技术相对较新。就像任何场效应管器件一样,氮化镓场效应管有两种结构:纵向半导体结构和横向半导体结构,这两种结构将在下节介绍。图 2-1 所示为氮化镓场效应管的基本几何结构。

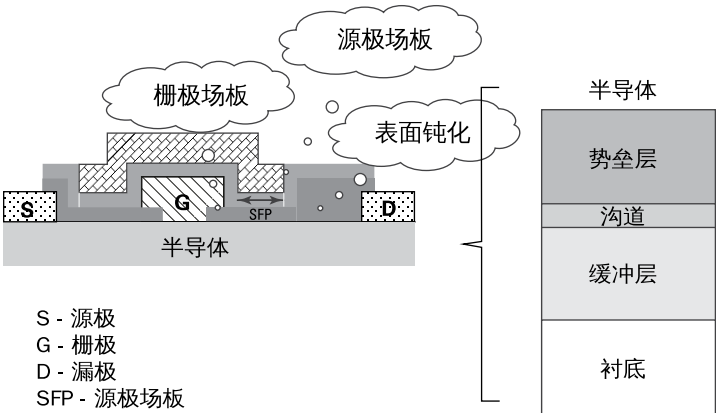


图 2-1: 氮化镓场效应管的基本几何结构。

氮化镓的纵向半导体结构

场效应管的纵向半导体结构包括:

- ✓ **栅:**这是一个金属层,其电压控制着电子沟道的电气特征。
- ✓ **势垒层:**这个半导体层将栅极和沟道隔离,使沟道与栅极之间流过非常低的电流。在氮化镓场效应管中,势垒层一般由氮化铝镓制成,铝浓度从 15% 至 28% 不等。铝的浓度越高,势垒层越高,也因此沟道的电荷容量也越高(电子开始流向栅极之外的电荷)。高电荷沟道容量是有利的,因为它增加了场效应管可以在漏极和源极之间流动的电流。

铝成分的增加也可增加器件的本征应变,降低器件的可靠性。我们将在第 3 章深入讨论本征应变。
- ✓ **沟道:**沟道是电子从源极流向漏极经过的区域。沟道一般由高质量氮化镓制成,具有大“迁移率”和高“饱和速度”。迁移率和饱和速度是描述电子在固体内移动速度的两个参数。迁移率和饱和速度越高,在漏极和源极之间循行的电流越大。
- ✓ **缓冲层:**缓冲层的作用是将电子的活动限制在沟道范围内。换句话说,缓冲层起到势垒层的作用,防止电子辗转进入衬底。在氮化镓场效应管中,缓冲层一般由掺杂了碳 (C) 或铁 (Fe) 的氮化镓制成。
- ✓ **衬底:**衬底是纵向结构的最后一层,也是厚度最高的一层。衬底提供了机械支撑、热量扩散和电磁禁闭功能。氮化镓场效应管使用异质衬层(使用的是硅或碳化硅,而不是氮化镓)。由于衬层不是氮化镓,因此它的晶格与缓冲层不同。这就造成了材料的错位,并最终降低了栅极与沟道之间的电绝缘。

氮化镓的纵向场效应管结构提供的电流密度高于硅或砷化镓,这也是氮化镓非常适合制作射频功率放大器的原因。碳化硅基氮化镓场效应管还具有较高的导热系数(约为 330 W/mC ,相比之下,硅的导热系数约为 145 W/mC ,砷化镓的导热系数约为 52 W/mC),这样氮化镓场效应管可在不增加器件温度的情况下传导更多功率。

在不利的一面,氮化镓的栅极绝缘性较低(约为 $\mu\text{A/mm}$,相比之下,硅为 pA/mm ,砷化镓为 nA/mm),这是因为材料内部存在大量晶格错位。

氮化镓的横向器件结构

像任何其他场效应管一样,氮化镓的横向结构包含以下几个部分:

- ✓ 源极
- ✓ 源极连接区域
- ✓ 栅极控制沟道区域
- ✓ 漏极连接区域
- ✓ 漏极

横向结构的最重要部分是栅极。栅极的尺寸决定了器件的速度。栅极越小,电子流过栅极控制沟道的速度越快,因此器件的速度也越快。氮化镓场效应管的栅极长度通常为 0.1 至 $0.5 \mu\text{m}$ 。

漏极到栅极的连接区域也是一个重要部分。如果漏极到栅极的连接区域较长,则可支持较高电压,因此可以提供较高的射频功率,但要以牺牲扩散功率为代价。因此,为支持特定的电压应用,器件技术专家应当总是选择最小的漏极到栅极间距。漏极到栅极的间距通常为 3 至 $8 \mu\text{m}$;要增加击穿电压,则应加大漏极到栅极的间距;要提高速度和射频效率,则应减少漏极到栅极的间距。

场效应管的横向电场非常不统一,电场峰值接近栅极的漏极边缘。非常高的电场并不好,原因有二:

- ✓ 半导体表面的高电场减少了器件可以在极短时间内提供的最大电流(这种现象被称为“电流崩塌”)
- ✓ 沟道内的高电场可产生碰撞电离,在这一过程中,电子获得了极高速度,可以突破原子之间的共价键,如果不加控制,可能损坏器件。

氮化镓场效应管的横向几何结构使用场板处理高电场。根据连接位置和使用方式,场板可分为两种:

- ✓ **栅极场板:**栅极场板与栅极相连。在非常靠近栅极的半导体表面,栅极场板对降低电场特别有效。因此,栅极场板减少了漏极到栅极电压较低时的电流崩塌现象。
- ✓ **源极场板:**源极场板与源极相连,将栅极与漏极屏蔽(这种属性被称为“法拉第效应”)。通过将栅极与漏极屏蔽,减少了漏极与栅极之间的反馈,增加了射频增益。当漏极到栅极电压较高时,源极场板还被用于降低表面电场,从而减少电流崩塌。

氮化镓场效应管的工艺

图 2-2 所示为典型的氮化镓场效应管工艺。首先从碳化硅衬底开始,在衬底上生长纵向半导体主层(缓冲层至沟道层,以及势垒层)。我们在第 1 章提到,这种生长是通过金属有机化学气相沉积或分子束外延实现。

横向几何结构的形成要通过五个基本步骤:

1. **器件隔离:**器件隔离通过离子注入或台面形成技术(移除沟道层)完成。场效应管器件之间的隔绝对制作射频电路极为重要。
2. **欧姆接触金属层:**欧姆接触金属化形成源极和漏极。在氮化镓中,欧姆接触金属化必须在极高温度下进行,这个温度远高于其他半导体。
3. **氮化物钝化:**在漏极和源极成型后,进行半导体钝化,最常使用的钝化材料是氮化硅。

4. **氮化物开口与栅极金属沉积:**氮化硅内形成孔口,金属在孔口上方沉积,形成栅极。现在基本的场效应管已经完成!
5. **其他氮化物层和金属层:**多层氮化物和金属沉积后,这些沉积层分别形成源极场板、内部连接层和电容器层。这些分层也可保护器件,防止外部因素干扰。

最后,衬底薄化(通常薄至 $100\text{ }\mu\text{m}$),衬底底部金属化,形成过孔(衬底顶部和底部之间的短通路)。过孔降低了器件与地(金属化底层)之间的寄生电感。

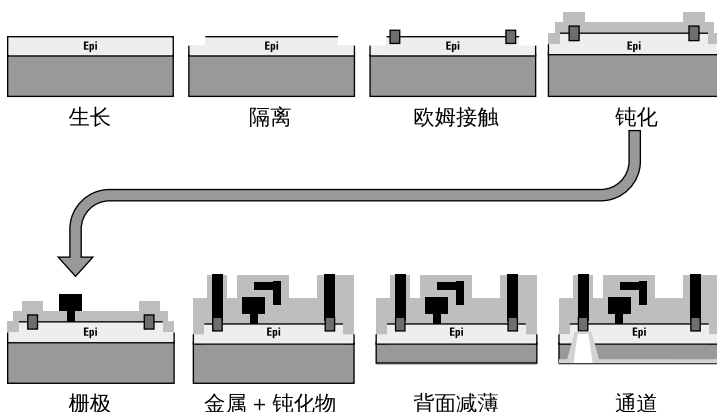


图 2-2: 典型的氮化镓工艺流程。

氮化镓与其他场效应管技术的比较

图 2-3 所示为有阻性负载线的场效应管的电流电压特征。该器件的电流电压特征主要表示为三个参数:

- ✓ I_{DMax} : 最大饱和电流
- ✓ V_{BR} : 击穿电压
- ✓ R_{On} : 漏极与源极之间的开态电阻

这三个参数本身控制着器件的射频功率性能。射频功率与负载的电流和电压摆幅成正比,因此,也与器件参数 I_{DMax} 和击穿电压成正比。

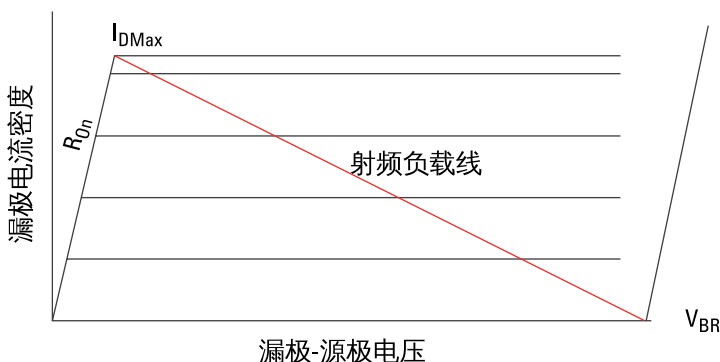


图 2-3: 场效应管的电流电压特征。

在第 1 章中,我们解释了氮化镓提供的电流高于其他半导体,原因就是氮化镓拥有较高的沟道电荷容量和较高的饱和速度。在第 1 章中,我们还说明了氮化镓由于带隙较大,在常见的半导体中,可以承受较高的击穿电场。这就是氮化镓在各种半导体中,可以提供最高射频功率的原因。

记住



碳化硅基氮化镓的功率性能约为 5 W/mm , 相比之下, 砷化镓约为 1 W/mm , 硅约为 0.3 W/mm 。

参数 R_{On} 较低也很重要, 这是因为电阻产生损耗, 降低了器件的射频效率。在各种半导体材料中, 氮化镓并没有最低的 R_{On} 值 (磷化铟和砷化镓更好), 但是鉴于氮化镓支持的大电压, 氮化镓对整体效率的影响较低。



当您需要最高射频功率处理能力时 (电流和电压), 使用氮化镓。

氮化镓场效应管的高级几何结构

为提高氮化镓场效应管性能, 可以使用几种高级几何结构技术:

✓ **半导体势垒层:** 氮化铝镓半导体的势垒层通常在两端包括一个盖帽与垫片层。盖帽层由氮化镓制成, 降低了半导体表面的本征应变, 提高了器件的可靠性。垫片由氮化铝制成, 提高了电子在沟道内的迁移性。其他半导体势垒层的高级技术还包括:

- **氮化铟铝:** 用于获得更高的电子密度和更高的速度。氮化铟铝可与氮化镓进行晶格匹配, 从而可以消除氮化铟铝等常用势垒层的本征应变。
- **栅极金属绝缘子:** 用于降低栅极电流和功率扩散。通常, 绝缘子包括氮化物层或原子层沉积层, 例如氧化铝。

原子层沉积是一种依靠表面化学作用, 将原料薄膜沉积到衬底的工艺。原子层沉积反应使用两种被称为“前驱体”的化学物质。前驱体反应后, 在衬底形成薄膜。

- ✓ **沟道:** 典型电子沟道由氮化镓制成。还可添加铟, 形成氮化铟镓电子沟道。铟的存在提高了电子的迁移性和封闭性。
- ✓ **缓冲层:** 在多数场效应管的实施例中, 缓冲层都由氮化镓制成。更加先进的缓冲层使用低铝氮化铝镓, 以提高电子的封闭性和降低短沟道效应。



第3章

实际应用考虑因素

本章提要

- ▶ 认识可靠性和失效模式
- ▶ 管理热设计带来的挑战

在前面几章，我们介绍了氮化镓技术和氮化镓场效应管。在本章，我们将向您介绍氮化镓技术在系统应用时的实际考虑因素。这里，我们将向您介绍氮化镓技术部署的可靠性与失效模式，并且为管理氮化镓的热设计问题提供一些建议。

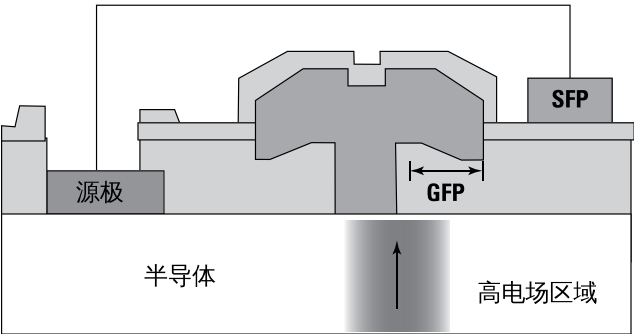
氮化镓的可靠性与失效模式

与采用其他半导体技术工艺的晶体管相比，氮化镓晶体管的一个主要优势是其工作电压和电流是其他晶体管的数倍。但是，这些优势也带来了特殊的可靠性挑战。

其中挑战之一就是因为在栅极和电子沟道之间通常使用的氮化铝镓（我们在第2章有讨论）。氮化铝和氮化镓的晶格常数不同。当氮化铝在氮化镓上生长时，其晶格常数被迫与氮化镓相同，从而形成应变。氮化铝镓势垒层的铝含量越高，晶格常数之间的不匹配越高，因此应变也越高。

然后，氮化镓的压电通过反压电效应，在系统内产生更大应变。如果氮化镓的压电属性产生电场，则反压电效应意味着一个电场总会产生机械应变。这种压电应变增加了氮化铝镓势垒层的晶格不匹配应变。

在正常运行中,在栅极靠近漏极的边缘位置,氮化镓场效应管不得承受高电场。如果场效应管设计不当,则反压电效应在势垒层上产生的额外应力可能导致器件破裂和退化。图 3-1 所示为带源极和漏极的氮化镓场效应管,并且有电压施加到栅极。图 3-2 所示为反压电效应造成的材料结构性能退化。



SFP – 源极场板
GFP – 栅极场板

图 3-1: 场效应管的高电场区域。

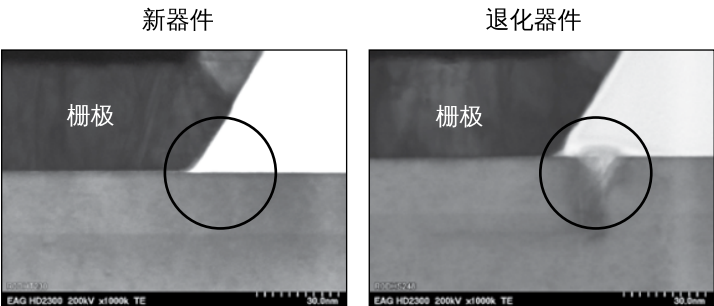


图 3-2: 在栅极靠近漏极的边缘位置发生机械性能退化。

为降低和消除氮化镓晶体管的本质故障模式,技术人员需要适当设计半导体势垒层的结构和厚度,提高半导体表面的强度。如果设计适当,这种失效模式可以消除。

今天,氮化镓晶体管的可靠性非常好,在 200 摄氏度下,MTTF超过 1000 万小时,这与其他半导体相当甚至更好。更为重要的是,Qorvo

等公司已经证明,在 200 摄氏度下,器件工作 100 万小时的失效率低于 0.002%。图 3-3 所示为 Qorvo 公司第二代 0.25 μm 氮化镓场效应管技术的典型可靠性阿伦尼乌斯图。

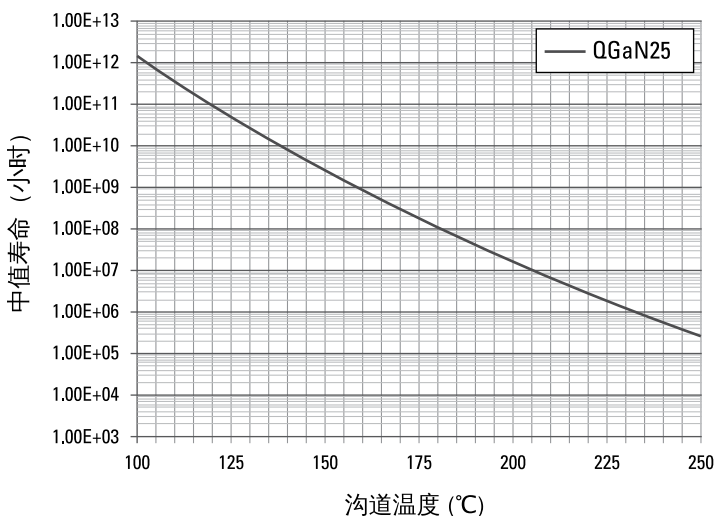


图 3-3: Qorvo 氮化镓场效应管技术的典型可靠性图。

利用 Qorvo 技术管理热设计挑战

功率放大器的器件技术总是关于在相同或较高速度下,如何增加晶体管的射频功率密度和增益。功率密度和增益的提高可以减少增益级数和合成损耗,并且最终限制芯片在给定频率下,可以提供的原始功率、增益和效率。

功率密度的不断提升推动相关技术从硅转移到标准砷化镓,再到高压砷化镓,最终到氮化镓。

随着技术向高功率密度场效应管技术的迁移,器件的温度管理问题也在增加。保证器件的“凉爽”是重要的,这是因为高温导致器件的原始性能和可靠性退化。在理论上,氮化镓在相对较高频率下,可提供的功率密度超过 20 W/mm。但是,在实际中,由于在非常紧凑的空

间内,大量热量的散发造成高温,氮化镓的使用被限制在 5 W/mm 以下。

热设计挑战是碳化硅成为高性能射频应用首选衬底材料的最终原因。碳化硅的导热性就像氮化镓的高射频功率一样重要。也正是这个原因,Qorvo 等公司已经开始研究钻石等热属性更好的衬底材料。

为管理今天的热设计,电路设计人员让热量在半导体表面扩散,增加器件单元之间的距离或缩小器件单元。但是,热设计不仅仅是芯片层面。封装工程人员也必须帮忙,因为芯片封装接口的热通量也较高。为确保氮化镓器件能够提供最大限度射频功率密度,芯片与封装包之间的良好热接口极为重要。



在氮化镓技术中,热设计与电气设计同等重要。

第4章

关于氮化镓技术的十个重要事实

本章提要

- 发现氮化镓的不同之处
- 认识氮化镓的优势

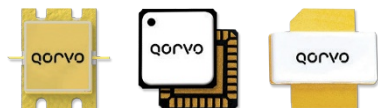
在

本章, 我们需要记住关于氮化镓技术的十个重要事实。

- ✓ **氮化镓器件提供的功率密度比砷化镓器件高十倍。**由于氮化镓器件的功率密度较高, 因此可以提供更大的带宽、更高的放大器增益, 并且由于器件尺寸的减少, 还可提高效率。
- ✓ **氮化镓场效应管器件的工作电压比同类砷化镓器件高五倍。**由于氮化镓场效应管器件可在更高电压下工作, 因此在窄带放大器设计上, 设计人员可以更加方便地实施阻抗匹配。
- 所谓“阻抗匹配”, 是指在负载的输入阻抗设计上, 使得从器件到负载的功率传输最大化。
- ✓ **氮化镓场效应管器件提供的电流比砷化镓场效应管高二倍。**由于氮化镓场效应管器件提供的电流比砷化镓场效应器件高二倍, 因此氮化镓场效应器件的本征带宽能力更高。
- ✓ **氮化镓在器件层面的热通量比太阳表面的热通量还要高五倍!**“热通量”是单位面积的热量输送率。由于氮化镓是高功率密度器件, 因此它在非常狭小的空间内散发热量, 形成高热通量。这也是氮化镓器件的热设计如此重要的原因。



- ✔ **碳化硅的导热性是砷化镓的六倍, 是硅的三倍。**碳化硅具有高导热性, 这使它成为高功率密度射频应用的首选衬底。
- ✔ **氮化镓的化学键强度是砷化镓化学键的三倍。**因此, 氮化镓的能隙更大, 能够支持更高的电场和更高的工作电压。
- ✔ **氮化镓—氮化铝镓结构的压电性是砷化镓—砷化铝镓结构的五倍。**在第 1 章, 我们解释了压电性及其为何在氮化镓中很重要。由于氮化镓—氮化铝镓结构具有较高的压电性, 因此电气和物理属性之间是相关的。
- ✔ **碳化硅基氮化镓材料的晶格错位密度约为砷化镓的 10,000 倍。**因此, 与同类砷化镓器件相比, 栅极电流往往较高, 需要电路设计人员的额外注意。
- ✔ **氮化镓—氮化铝的应力是砷化镓—砷化铝的 20 倍。**由于氮化镓—氮化铝的应变性高于同类砷化镓—砷化铝系统, 因此在所有层面进行应力分析很重要。
- ✔ **Qorvo 的氮化镓器件在 200 摄氏度下工作 100 万小时, 失效率低于 0.002%。**最终结论: 该技术已成熟。



氮化镓技术在核心射频应用上的进步

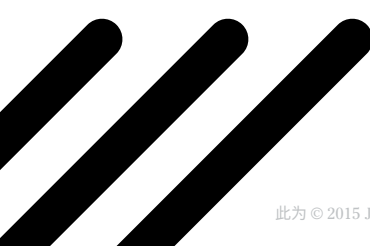
Qorvo 是氮化镓产品的业界领导企业：

- 国防应用：雷达、电子战、通信
- 商业应用：有线电视、基站、点对点无线电、甚小口径终端

Qorvo 通过不断广泛实施氮化镓研发项目，找到了提高以下性能的新方法：

- 提高功率密度，减小尺寸
- 提供超常输出功率
- 提高效率，降低功率消耗
- 拓宽频率范围
- 提高可靠性和设备强度

更多信息，请访问：qorvo.com/GaN



qorvo™

WILEY END USER LICENSE AGREEMENT

Go to www.wiley.com/go/eula to access Wiley's ebook EULA.