

致谢 QORVO

氮化镓的 射频应用

FOR
DUMMIES[®]

您将了解:

- 氮化镓如何有益于系统应用
- 氮化镓的使用理由与时机
- 氮化镓的重要设计因素
- 氮化镓的多重应用

安德鲁·摩尔
艾里亚斯·里斯



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>。



氮化镓的 射频应用

FOR
DUMMIES[®]

Qorvo 专版

安德鲁·摩尔
艾里亚斯·里斯

WILEY

氮化镓的射频应用, 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用性保证。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·门格尔

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

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。

对于电子战、雷达、卫星、有线电视和蜂窝式移动数据通信等高功率应用,氮化镓是首选技术。与固态电子器件中常用的硅和砷化镓等材料相比,氮化镓设备可在更高电压和更高频率下运行。氮化镓器件也非常高效,这使得它们在被用于高功率应用时,还可以节能。

由于氮化镓的独特属性,它是电路设计人员工具箱里的有力工具,尤其在设计高功率、高频率应用时。但是,电路设计人员在使用氮化镓器件进行设计时,需要知道许多重要因素。

在本书中,您将了解如何以及为何在您的设计中使用氮化镓,以及氮化镓的一些不同的制造和封装形式。您还将了解使用氮化镓技术设计电路时需要考虑的重要因素,以及氮化镓设备在射频应用中的几种应用形式。

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 19 世纪印象主义的书,那就另当别论!

书中使用的符号

在本书中,我们使用一些特殊符号,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

氮化镓的设计作用

本章提要

- ▶ 认识氮化镓的成本优势
- ▶ 探索重要的设计考虑因素
- ▶ 了解如何使用氮化镓器件设计电路

氮化镓器件特别适合在高频率下工作的高功率应用，例如，电子战使用的射频功率放大器、雷达、卫星通信和移动通信基础设施。氮化镓在许多其他射频电路功能上也有优势。氮化镓在高功率放大器上的应用价值最大，这也是本书的重点。本章帮您了解氮化镓在设计中为何以及如何发挥作用。

氮化镓的成本优势

在产品设计上，使用氮化镓器件可以实现多项成本优势。虽然往往认为氮化镓费用高，但当您知道如何以及为何使用氮化镓后，氮化镓却可降低成本。在使用氮化镓时，您可以降低以下三项主要成本：

- ✔ **开发成本：**氮化镓的适当使用可以降低射频电路设计的复杂性，提高系统开发的速度，降低风险，同时提高性能和减少尺寸。氮化镓还可以减少功率和热设计等系统其他方面的要求。
- ✔ **购置成本：**氮化镓组件可以降低射频子系统的成本。最明显的因素是高功率放大器中氮化镓器件每瓦功率成本的降低。不过，由于电路组件及其尺寸的减少还影响到功率供应、分配和热设计等因素，因此还可能在系统层面上更多地降低成本。

- ✓ **运行成本:**对于基于氮化镓的产品,最终成本优势在系统的使用寿命上实现。使用氮化镓组件设计的系统在能耗、重量、尺寸和维护上的要求都有降低。虽然设计人员为获得更高的功能等级,可能增加尺寸、重量、维护和/或能源成本要求,但是这种权衡处于系统设计人员的完全控制之下。

所有氮化镓电路设计的共同考虑因素

电路和系统设计人员在决定使用氮化镓器件时,必须考虑各种因素。在本节,我们将介绍部分重要考虑因素。

降低了供电电流和功率损耗

氮化镓可在更高的偏置电压下工作,这在系统/子系统和电路级别提供了多种优势。在功率等级保持不变的情况下,工作电压越高,电路的电流同比降低。

电路所需电流的降低还降低了整个系统的供电分配,从而提高了系统效率。该损耗的最小化(转化成热量)降低了热设计难度。最终结果:氮化镓提高了尺寸、重量和功率在系统层面上的权衡度。

减少了半导体的升温

半导体对温度的敏感性不足为怪。如果温度过高,工作可靠性可能降低。如果温度变化过高,所需功能的保持将变得更加困难。半导体的最大温度和温度范围都必须控制在电路和系统范围内。这种热设计功能在电路和系统设计中极为重要。

在高功率射频系统,热设计更加重要,这是因为从本质上讲,功率损耗越大,生成的热量越多。为确保工作可靠性,半导体沟道的温度(T_{ch})必须保持足够低。

氮化镓在保持足够低温和正常工作提供了几个独特优势。最为重要的是,与砷化镓或硅相比,氮化镓可在更高温度下保证可靠运行。对于给定的温度参数 T_{ch} , 氮化镓可提供高出几个量级的寿命。例如,对于 100 万小时 MTTF, 氮化镓的工作温度 T_{ch} 可以比砷化镓轻易高出 50 摄氏度。图 1-1 所示为阿伦尼乌斯图,其中比较了砷化镓和氮化镓的可靠性。

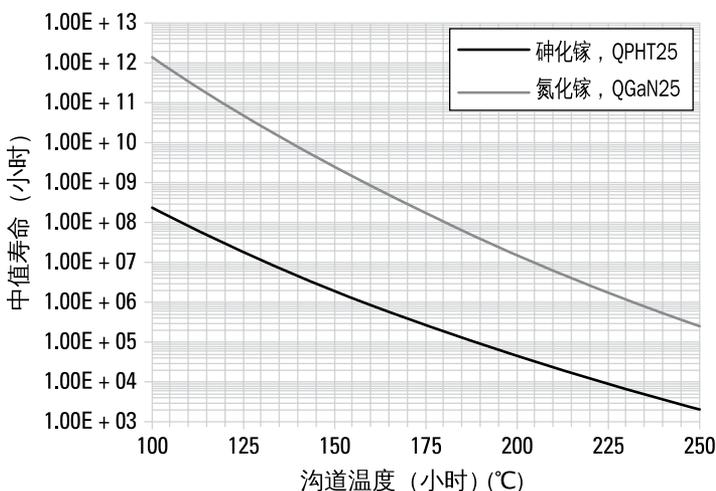


图 1-1: 砷化镓与氮化镓的可靠性比较。

碳化硅是氮化镓射频功率器件的首选衬底。碳化硅提供的导热性远高于砷化镓或硅衬底。较高的导热性降低了衬底的温度上升幅度。由于导热性的改善,高功率晶体管可以设计较小的裸片尺寸。高功率砷化镓放大器使用的常规热设计往往遭到抛弃——砷化镓衬底的导热性远低于焊接剂或封装基底。在砷化镓器件中,最大的升温来自器件本身。碳化硅的导热性大于焊接剂和多数封装基底材料,因此多数升温往往位于裸片贴装、封装基底和封装基底的散热片接口。



为准确计算和控制高功率氮化镓组件的温度参数 T_{ch} ，要尤其注意上级总成和子系统的热设计。氮化镓虽然可以实现有效的热设计，但为实现这一点，它对产品设计有着不同的需求。建议利用更高且安全的温度参数 T_{ch} 。

提高效率，减少尺寸

在半导体器件层面上，氮化镓可以极大提高效率和显著减少尺寸。这个优势是首先、也是最容易认识到的。更要注意的是在系统层面上的显著改善。多个因素都可改善系统的射频效率：

- ✔ **功率添加效率 PAE:**在射频电路的整体效率改善上，氮化镓晶体管的功率添加效率是一个主要的、也是人们了解最多的方面。在 10 GHz 以上，氮化镓的功率添加效率要超过同样尺寸的砷化镓器件，在 1 GHz 以上，氮化镓的功率添加效率也要超过硅。
- ✔ **场效应管的单元尺寸:**最大可用单元尺寸取决于晶体管周边合成相位相干性的保持。在相同频率下，氮化镓器件的“功率密度”(单位周长的功率)通常比砷化镓单元高五倍，这使得氮化镓的输出功率等级比砷化镓高五倍。简而言之，您使用五分之一尺寸的氮化镓晶体管，就可获得与砷化镓晶体管相同的功率输出。尺寸才重要！
- ✔ **射频功率合成:**为获得适合的功率，设计人员会用到射频功率合成功能。氮化镓可让您合成少量晶体管，产生较低的功率损耗和形成较小的电路。在射频放大器中，通过减少输出合成和匹配网络的损耗，可以直接提高效率。通过在高功率应用中使用氮化镓，可以同时提高合成网络和匹配网络。

在电路中使用氮化镓器件

您可以通过各种形式,向电路中使用氮化镓器件。在本节,我们将介绍部分使用形式。

封装形式

氮化镓器件有许多可供射频电路设计使用的封装形式。封装可显著改善处理的方便性、机械强健性和装配便利性。氮化镓器件的所有功能层面都可作为封装部件提供,其频率范围从直流频率到毫米波频率(大于 30 GHz)。

今天使用最普遍的氮化镓产品形式是行业标准法兰和表面安装配置中的封装分立式功率晶体管,该技术可以直接替代其他功率晶体管技术。图 1-2 所示为法兰封装氮化镓晶体管, T1G2028536-FL。

氮化镓所具有的高频率和高功率等级能力是现有微波封装技术进步背后的推动力。在与砷化镓相同的封装尺寸下,设计用于在 50 欧姆系统下工作的单片微波集成电路和内匹配氮化镓晶体管可以实现更高的功率等级。



图 1-2: 法兰封装氮化镓功率晶体管, T1G2028536-FL。

裸片形式

封装产品使用的氮化镓器件还可提供裸片形式。裸片形式使得设计人员可以控制裸片贴装和内部连接,实现紧凑式模块设计或更高性能的电路设计。其设计不利之处是晶体管的处理、贴装和内部连接难度加大。

晶圆代工服务

虽然许多供应商都提供氮化镓产品,但是很少有供应商像 Qorvo (www.qorvo.com/foundry) 一样,通过代工服务让客户接触氮化镓工艺。代工服务使得设计人员可以控制电路的各个方面(电气、热工和机械),达到最高的性能等级。

第2章

微波电路中的氮化镓

本章提要

- ▶ 查看使用氮化镓功率晶体管的射频和微波放大器
- ▶ 认识氮化镓单片微波集成电路和射频集成电路
- ▶ 氮化镓在宽带功率放大器上的使用
- ▶ 氮化镓的其他电路应用:低噪声放大器、开关、倍频器和有限电视放大器

在

第1章,我们高屋建瓴,介绍了氮化镓对射频和微波系统的价值原因和作用方式。在本章,我们以功率放大器为重点,更加深入地介绍氮化镓在一些电路应用中的使用。

射频和微波功率放大器

在许多情况下,氮化镓理所当然地是高功率射频和微波放大器的最佳选择。在我们每个人的心目中,工程师需要说明多少才是“高”,还要说明什么才是“最佳”。“最佳”是一个较为简单的概念,是指在系统层面提供优秀的性能:就像第1章所讲,降低开发成本、风险和时间的同时,提高功能性。我们在后文解释多少才是“高”。

氮化镓什么时候才是最佳选择

与其他半导体技术相比,氮化镓提高了速度与信号等级的最高组合。这种速度与信号等级的组合表现为:

- ✔ 在特定频率下,提供了最高增益、功率和效率
- ✔ 在特定信号强度等级下,提供了最高频率、增益和效率

氮化镓工艺针对不同频率范围的最高性能进行了优化。业界提供的氮化镓的最大工艺范围由 Qorvo 提供。Qorvo 提供各种电压和频率范围的功率晶体管,非常适合操作。

- ✔ 65 V VDD, 6 GHz (QGaN50)
- ✔ 48 V, 10 GHz (QGaN25HV)
- ✔ 40V, 20 GHz (QGaN25)
- ✔ 22V, 50 GHz (QGaN15)



高功率放大器是今天氮化镓技术的主要应用。什么时候应当使用氮化镓?对于高功率放大器,一个简单的指导原则是:只要氮化镓能让高功率放大器的最关键方面——输出匹配网络——发挥最大性能,就要使用氮化镓。输出匹配网络一旦不完美,就可直接降低高功率放大器的输出功率和效率——高功率放大器的两个关键要求。在效果上,所谓的不完美就是相对于理想输出匹配网络的电路损耗。

下面是输出匹配网络的两个主要功能:

- ✔ 在场效应管和系统阻抗之间进行阻抗匹配
- ✔ 将输出级晶体管使用的所有场效应管单元发出的信号合成

上述任何一项功能需求的降低,都可实现网络损耗的最小化。氮化镓对这两个功能都有帮助。由于氮化镓的工作电压高于砷化镓,因此降低了高功率放大器的阻抗变换比。氮化镓具备优势的最低功率等级(这个最低功率等级可根据设备的工作电压(变换阈值)进行计算)。图 2-1 所示为典型氮化镓和砷化镓设备在一系列应用频率范围内,从系统阻抗到最佳场效应管负载阻抗所需的变压阈值。

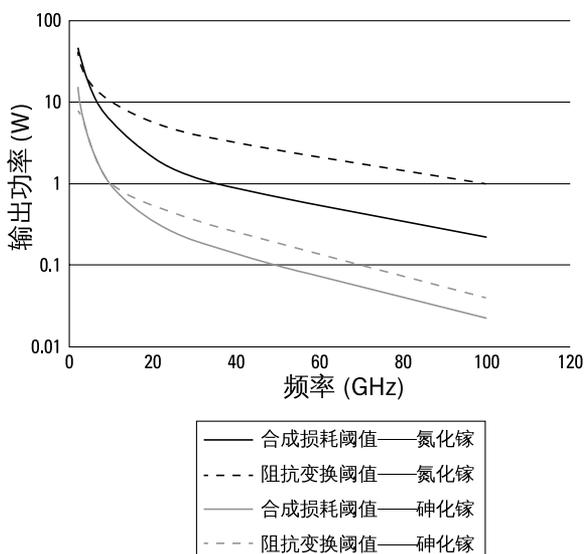


图 2-1: 高功率放大器的氮化镓和砷化镓设计阈值。

以 10 GHz 高功率放大器为例。氮化镓高功率放大器在总输出功率达到大约 10 瓦之前，不需要阻抗变换。而砷化镓高功率放大器在 10 倍以下功率（约 1 瓦）时就需要阻抗变换。阻抗阈值作为频率函数发生变化，这是因为场效应管设备在针对高频范围优化后，在较低电压和较低功率密度下工作。

现在，考虑造成损耗的输出匹配网络的第二个功能——将场效应管多个单元发出的信号进行合成。合成的单元数量越多，损耗等级越高。需要进行合成的最低功率等级在图 2-1 中显示为合成阈值。通常，高功率放大器要尽量少用晶胞，这里氮化镓也有一个优势。同样以 10 GHz 为例，您会在图 2-1 中看到，在 10 GHz 时，典型的氮化镓场效应管的单元可以提供大约 6 瓦输出功率，而典型的砷化镓场效应管的单元提供大约 1 瓦输出功率。如果输出功率需求高于砷化镓的 1 瓦合成阈值，则氮化镓高功率放大器将会降低输出合成网络损耗。



图 2-1 所示的计算内容使用了大量简化假设。该图只是简要说明了氮化镓技术对满足大功率放大器需求的大量益处,但像往常一样,您应当进行详细的设计研究,以达成最终结论。

认识氮化镓的最佳形式

在第 1 章,我们介绍了氮化镓设备的不同产品形式。在本节,我们看一看每种产品形式的权衡之处。

封装形式与裸片形式

对于多数应用而言,封装设备提供了最大的使用便利性。封装设备的最明显优势是装配方便。还有一个关键好处,就是场效应管单元的信号合成在封装包内已经完成。再者,对于成功的氮化镓设计,热设计有时是最难以处理、而又往往被忽视的问题。封装产品的不太明显、但有争议的最大价值优势是它解决了热设计的前三个层面:裸片、裸片贴装和散热器。



封装工艺用于各种形式的氮化镓器件:晶体管、预匹配晶体管和单片微波集成电路。氮化镓代工服务还可包括 Qorvo 等高度集成化产品供应商的封装。

裸片形式的器件提供了最大的设计灵活性和实施能力,但是也有不利之处:设计流程时间延长、难度增加;装配难度增加;可用的供应商有限。当设计要求最高性能和最小尺寸时,裸片形式是更好的选择。

功率晶体管

氮化镓设计的最常见产品形式是功率晶体管。封装功率晶体管可以广泛提供业界标准和定制封装格式。Qorvo 提供广泛的晶体管功率等级 (www.qorvo.com/go/discrete-transistors)。对于氮化镓放大器而言,封装功率晶体管提供了很好的灵活性,易于装配,并且设计周期短。图 1-2 所示的 285 瓦功率晶体管是 Qorvo T1G2028536-FL。

功率晶体管的灵活性不仅用于常规单端放大器,而且用于其他电路,提供了特殊功能优势。有些使用功率晶体管的电路是平衡放大器、推挽放大器、Doherty 放大器等等。由于 Doherty 高功率放大器对晶体管的高增益具有敏感性,因此尤其适合氮化镓设备。通信系统使用的高效率线性功率放大器往往因为使用 Doherty 放大器而获益(www.qorvo.com/go/defense-gan)。

裸片形式的功率晶体管非常适合要求较高性能级和较紧凑电路总成的设计。通过使用晶体管裸片,可将其加入定制封装、模块或较小区域。晶体管裸片消除了封装附带的寄生元件,因此可以实现更高的带宽和性能,提高电路的可重复性。不过,其不利之处是处理、贴片、内联和热设计的难度增加。

图 2-2 和 2-3 所示分别为封装功率晶体管和功率晶体管裸片。

内匹配晶体管

内匹配场效应管有时也被称为“全匹配晶体管”,通常以封装形式提供。在特定频率范围内,内匹配晶体管与系统阻抗(典型 50 欧姆)匹配。不过,偏置网络并不包括在内,并且内匹配场效应管仅限于一个增益等级。内匹配场效应管只需要极少的电路板设计;只有放大器的偏置电路必须外部实施。

由于所有射频匹配网络都针对固定频率范围做过优化,并且实施位置非常靠近本征晶体管,因此内匹配场效应管可以提供优秀的性能。使用内匹配场效应管的不利之处是:降低了应用的灵活性;其设计专门针对有限的频率范围。



图 2-2: 封装的 55 瓦 28 伏直流 3.5 吉赫氮化镓射频功率晶体管, T2G4005528-FS。

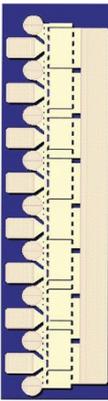


图 2-3: 50 瓦 12-32 伏直流 18 GHz 氮化镓射频功率晶体管裸片, TGF2023-2-10。

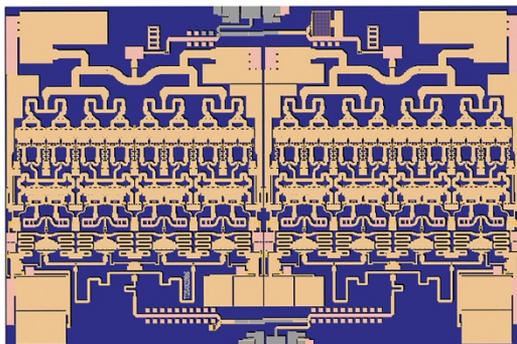
单片微波集成电路与射频集成电路

单片微波集成电路和射频集成电路在微波电路中提供了最高的功能性和最小尺寸。除功率放大器外,单片微波集成电路还被用于低噪声放大器、驱动放大器、开关、混频器、倍频器、信号控件和许多其他设备。因此,在过去三十年间,单片微波集成电路在砷化镓技术上有广

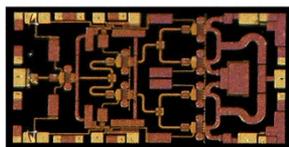
泛应用,并且在其他复合半导体材料和硅上也有应用。近年来,随着硅晶体管速度的进步,小型信号级射频集成电路的使用有所增加,并且最终导致单片微波集成电路使用的增加。

我们在前文提到的氮化镓的基本优势也同样适合单片微波集成电路。氮化镓在工作电压、工作频率和电特征上提高了性能。特别是相对于硅,氮化镓对衬底损耗的降低是一个重要优势。因此,对于要求高功率、高频率、高动态范围和小尺寸等苛刻的应用,氮化镓是最佳技术选择。此外,氮化镓的更高偏置电压降低了电流等级,这在单片微波集成电路是除更高功率等级之外的又一重要优势。电流往往决定了导电路径的宽度;氮化镓降低了线路宽度要求,这样在阻抗匹配网络中,有助于降低裸片尺寸和提高性能。

图 2-4 突出显示了氮化镓的优势,图中比较了两个 Ka 带高功率放大器的单片微波集成电路——其中之一是砷化镓,另一个是氮化镓——在 30 GHz 提供 6 瓦以上功率的情况。您会看到,砷化镓制成的单片微波集成电路体积稍大(图片按比例缩放),显示了砷化镓和氮化镓等级阈值合成的影响。氮化镓单片微波集成电路使用简单的四路合成输出匹配网络,在 30 GHz 下提供 6 瓦输出功率。砷化镓单片微波集成电路使用非常复杂的 32 路合成网络,却



3.86 x 5.71mm
砷化镓单片
集成电路



1.74 x 3.24mm
氮化镓单片
集成电路

图 2-4: 氮化镓与砷化镓 Ka 波段高功率放大器单片微波集成电路的比较。

只能提供大约相同的功率等级。氮化镓不仅大幅缩小了尺寸,而且降低了匹配损耗,有助提高功率附加效率。



做一个有趣的练习,拿来一把米尺,想像图 2-4 的单片微波集成电路尺寸。砷化镓单片微波集成电路比铅笔头上的橡皮略大,但是氮化镓单片微波集成电路只有 1.74 x 3.24 毫米,甚至比生米粒还小!

多年以来,业界一直以裸片为主,向封装单片微波集成电路转移。氮化镓单片微波集成电路加快了这一趋势。封装的氮化镓单片微波集成电路具有温补接口控制功能,因此更便于纳入产品设计。在单片微波集成电路的集成度上,氮化镓的高热通量密度更为关键,可以实现多级和多沟道放大。封装的氮化镓单片微波集成电路还包括热设计和管理的两个极为重要的层面:裸片贴装与散热片。

宽带功率放大器

“宽带”是一个相对的词,在射频/微波行业的解释存在相当差异。不过,在几乎每种应用上,“宽带”都是指比简单的现有解决方案更宽。影响带宽的两个主要因素分别是:阻抗变换网络的带宽,以及晶体管的本征带宽限制。在实际中,氮化镓可以为高功率放大器提供高带宽能力,这一点在几乎每种高功率射频和微波电路中也构成优势。

对于射频和较低微波频率(6 GHz以下)的高功率放大器,其设计通常采用工作带宽相应的主流阻抗变换网络。高功率晶体管的最佳阻抗负载远低于 50 欧姆,所以放大器的设计必须提供最高 50 欧姆的阻抗变换。

为简单说明,假设有一个没有电抗寄生分量的理想晶体管。要在 40 伏供电电压下实现 100 瓦输出功率,它必须运行到 8 欧姆负载。因此,放大器匹配网络必须将 50 欧姆变压至 8 欧姆。如果供电电压是 10 伏,则匹配网络必须变压至 0.5 欧姆。这成为非常困难的电路设计问题。工作电压的四倍增长将为阻抗变换比带来 16 倍的变化。本例中的 40 伏和 10 伏工作电压属于典型的 X 段设备,分别是氮化镓设备和砷化镓设备。简单结论:使用氮化镓设计高功率放大器更简单、风险更低、性能更高。

使用氮化镓的同样复杂度的匹配网络,由于氮化镓需要较低的阻抗变换比,因此可以实现更高的带宽。使用氮化镓的电路,带宽的增加不需要增加面积。或者,也可利用氮化镓的较低变换比实现相同带宽,降低电路复杂性,减少面积消耗。简而言之,使用氮化镓设备的设计人员拥有更大的权衡空间。例如,砷化镓高功率晶体管放大器可以在 2 GHz 下实现 50 MHz 瞬时带宽,而相同功率等级的氮化镓晶体管可以实现 200 MHz 带宽,并且匹配网络的复杂度相同。

为氮化镓晶体管带来优势的另一个因素是氮化镓的本征带宽能力。在理论上,使用无损耗匹配网络的最大带宽要远高于前文给出的例子。功率晶体管的本征输出阻抗可由并联电阻器/电容器网络很好地说明。在匹配网络复杂性无限的条件下,可以实现的最大瞬时带宽受到广为认可的波登—法诺限值的限制。



“波登—法诺限值”(Bode-Fano limit)指出,在复杂负载阻抗情况下,对于一个任意良性阻抗匹配,存在一个一般带宽限制。这个限值与电抗电阻比和可接受的负载不匹配度相关。

由于氮化镓具有较高的电流密度和较低的寄生电容,因此可以增加瞬时带宽。对于 Qorvo QGaN15 等工艺,提供优秀功率匹配的实际带宽可能大于 10 GHz。要实现达到理论极限的带宽,需要在晶体管和匹配网络之间保持非常小的尺寸,这种非常小的尺寸只有在单片微波集成电路中才可实现。

如果您还用到氮化镓的其他优势,那么您的电路设计可在很少妥协的情况下,实现较高的放大器带宽。图 2-5 所示的 Qorvo TGA2573-2 就是一个例子。分布式放大器可用于光调制驱动器等多路十进制带宽放大器。在这种放大器中,氮化镓的优势还是更高的工作电压。典型的高功率分布式放大器的输出功率限值为固定负载阻抗(例如,50 欧姆)的供电电压平方。当您在三倍偏置电压的氮化镓放大器和同类砷化镓放大器之间进行比较时,氮化镓放大器的输出功率是砷化镓放大器的九倍!

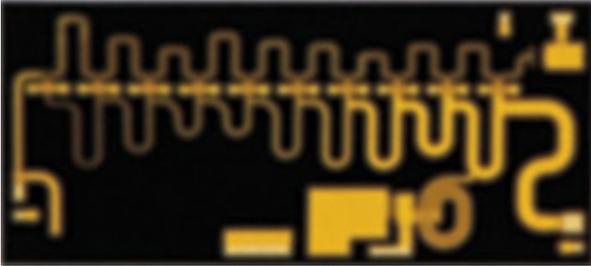


图 2-5: 10 瓦、2-18 吉赫氮化镓功率放大器单片微波集成电路, TGA2573-2。

其他氮化镓电路应用

除了上文提到的电路应用外,氮化镓技术还有其他电路应用。在这本介绍氮化镓的小书里,我们不会全部说明这些应用,但是会介绍几种,以飨读者。

低噪声放大器

氮化镓的噪声系数性能与砷化镓场效应管相当,因此低噪声放大器的噪声系数性能也相似。氮化镓的优势在于能够在不产生损害的情况下,处理更高的信号等级。对于存在高入射信号等级,要求在低噪声放大器前面加装限幅器的应用,这一点会有帮助。限幅器带来损耗,降低了系统的噪声系数。氮化镓低噪声放大器可以取消限幅器,提高系统的噪声系数性能。

一个低噪声放大器的例子是 TGA2612-SM,如图 2-6 所示。



图 2-6: 6-12 GHz 氮化镓低噪声放大器, TGA2612-SM。

高功率开关

氮化镓很适合射频开关应用。氮化镓拥有高击穿电压,再加上低开态电阻和低关态电容,可以实现功率处理能力的显著提升。在射频业界,砷化镓场效应管开关有着广泛应用,但一般用于几瓦量级以下的功率等级。氮化镓场效应管能够使用相同的电路架构,处理的功率可以达到数十瓦量级。这可以在相同的单片微波集成电路上,实施高功率放大器、低噪声放大器和其他信号控制电路。

一个高功率开关的例子是 Qorvo TGS2353-2-SM,如图 2-7 所示。



图 2-7: 0.5-18 GHz 高功率氮化镓 SPDT 反射开关, TGS2353-2-SM。

倍频器

倍频器是一种可以生成输出信号的电路,其生成的信号频率构成输入频率的谐波(倍频)。倍频器的部分应用包括无线通信、甚小口

径终端、点对点无线电、航天和测试设备等。Qorvo 倍频器的频率覆盖范围从 8 GHz 到 77 GHz 不等。

氮化镓在这些应用中也有出类拔萃的表现,其原因与在放大器上相同——氮化镓能够以更高的电压和频率工作,同时只使用较小的电路面积。

有线电视

对于需要高速度和大等级信号的其他应用,氮化镓的内在特点非常适合合作有线电视基础设施系统内部的关键组件。有线电视系统在全球信息通信网络中使用广泛,并且随着人们对于数据和信息传输需求的增加,有线电视系统组件也需要更快的速度和更高的输出功率——这些正是氮化镓本身的优势。

最早的有线电视基础设施于 20 世纪 70、80 年代部署,使用的是硅驱动放大器。到了 20 世纪 90 年代,有线电视的驱动放大器转向氮化镓技术,这是因为氮化镓能够提高数据传输速度、带宽和功率等级。氮化镓还带来了相对于砷化镓的速度和信号等级提供。今天,性能最高的有线电视驱动放大器使用的正是氮化镓设备,氮化镓设备提供了业界最大带宽和最高的线性输出功率。

使用氮化镓技术的有线电视放大器有 RFPD3210,如图 2-8 所示。



图 2-8: 行业标准混合包 RFPD3210 使用的 1.2 GHz 氮化镓-砷化镓倍增放大器。

第3章

氮化镓的十个成功关键

本章提要

- ▶ 利用氮化镓的高工作电压
- ▶ 选择最佳产品形式
- ▶ 最大限度地利用系统的隐含作用
- ▶ 利用热建模, 评估设计可靠性

在 本章, 您将发现氮化镓在电路设计上成功应用的十个关键因素, 以满足功率和频率需求。

- ✔ **氮化镓用于高频率和高功率。**与其他半导体微波设备相比, 氮化镓具有在较高电压下工作的独特能力, 这使得氮化镓可用于高功率应用。氮化镓设备可使用较少电流产生较高功率, 减少了电路板上的功率损失, 改善了系统的热设计。
- ✔ **利用产品使用上的灵活性。**对于功率晶体管和单片微波集成电路, 氮化镓既可以是封装形式, 也可以是裸片形式。部分匹配晶体管和全匹配晶体管都有封装形式。每种形式都有一些权衡之处, 设计人员应当仔细考虑。由于氮化镓可以有多种形式, 因此可用于满足几乎任何要求。
- ✔ **在下一级封装中引入热设计。**在设计高功率等级系统时, 热管理极为重要。氮化镓的杰出导热性有助于热设计。但是, 不利的是, 氮化镓的极高功率密度对系统的热设计造成额外应力。这一因素在设计之初需要考虑。
- ✔ **通过系统设计, 协调电路设计。**氮化镓电路在系统层面带来能力提升的同时, 也会产生一些不利之处。认识其中的影响, 通过系统设计优化电路权衡之处, 充分实现氮化镓的各种能力。

- ✔ **考虑温度互适性。**氮化镓器件的工作温度远高于许多其他半导体材料,因此非常适合需要高温工作的器件。由于安全工作温度范围大,在电路设计时需要特别注意器件的温度相依性。
- ✔ **利用工作电压的灵活性。**氮化镓的工作电压具有相当的灵活性,因此您要达到所需功率和频率可以有更多选择,在达到所需性能的同时,又能简化电路设计。
- ✔ **利用氮化镓的高功率密度和低寄生性。**当您需要最大化输出功率和最小化电路表面积时,可以考虑氮化镓的高功率密度。
- ✔ **利用高增益和高功率,减少级数。**氮化镓设备提供较高的可用增益,使得设计人员可以减少所需级数。充分利用氮化镓最小化电路面积,同时减少场效应管面积。
- ✔ **利用氮化镓的高功率输出能力,满足大动态范围需求。**在给定频率下,氮化镓能够在较高电压下工作,对于需要高动态范围的设计,您可以使用高信号等级。
- ✔ **利用热建模,评估设计可靠性。**氮化镓设备的 MTTF 长于其他半导体设备。对于给定的沟道温度 (T_{ch}),氮化镓在 MTTF 上高出不止一个量级。为建立准确的沟道温度 T_{ch} 和 MTTF,热建模极为重要。



氮化镓技术在核心射频应用上的进步

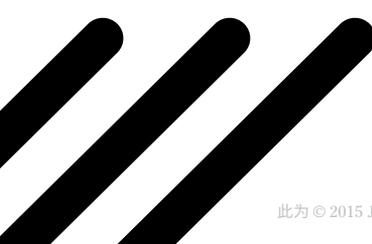
Qorvo 是氮化镓产品的业界领导企业：

- 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.