

文章编号: 2095-4980(2017)05-0697-05

一种应用于太赫兹频段的平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管

安 宁, 曾建平, 李志强, 刘海涛, 唐海林

(中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200)

摘 要: 介绍了一种 InP 衬底上的平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管的设计、制作和测试方法。为了提高器件的输出功率, 使用 Advanced Design System 2011 仿真软件设计了 $50\ \Omega$ 共面波导馈电结构作为器件电极, 减少测试功率损耗; 同时在版图设计时加大了金属电极面积, 改善器件的散热效果。测试结果表明, 当所加电压为 4.4 V 时, 沟道长度和宽度分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $120\ \mu\text{m}$ 器件的基波振荡频率为 168.3 GHz, 输出功率为 -5.21 dBm。这种高功率平面结构耿氏二极管在太赫兹频段具有巨大的应用潜力。

关键词: 太赫兹; $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$; 平面耿氏二极管; 振荡频率

中图分类号: TN36

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0697

Design and fabrication of planar $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ Gunn diode for terahertz wave application

AN Ning, ZENG Jianping, LI Zhiqiang, LIU Haitao, TANG Hailin

(Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China)

Abstract: Fabrication and measurement of the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ based planar Gunn diodes on the InP semi-insulating substrate is presented. In order to increase the RF output power of the planar Gunn devices, the planar Gunn diode is designed in $50\ \Omega$ Co-Planar Wave (CPW) guide format, which is designed using the Advanced Design System (ADS-2011). Meanwhile, increasing the area of the metal pads can improve the heat dissipation. For a $120\ \mu\text{m}$ wide device with a $2\ \mu\text{m}$ channel length, experimental results show a fundamental oscillation frequency of 168.3 GHz with a RF output power of -5.21 dBm. These planar Gunn devices show great potential as solid-state THz signal sources.

Keywords: terahertz; $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$; planar Gunn diode; fundamental oscillation frequency

近几年, 随着太赫兹(Terahertz, THz)技术的发展, 高功率低损耗的固态太赫兹辐射源成为研究的热点^[1-2]。基于负阻效应的耿氏二极管是太赫兹辐射源的一种, 具有工作频率高、稳定性好、噪声低等诸多优点^[3-6], 被认为是极具太赫兹应用潜力的电子学器件。

2007 年首次报道了基于 GaAs/AlGaAs 异质结结构的平面耿氏二极管, 其振荡频率为 108 GHz^[7]。与传统垂直结构耿氏二极管相比, 平面耿氏二极管的振荡频率由光刻尺寸决定, 有利于不同频率辐射源在单个芯片上的集成, 并且平面结构易于与现代单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)工艺技术兼容。2013 年, Khalid 等人设计并制作了一种 InP 衬底上的平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管, 沟道长度分别为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$, 器件的基波振荡频率为 68.4 GHz、164 GHz, 射频输出功率为 -17.3 dBm、-10 dBm^[8]。相比于 GaAs 材料体系, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料具有更高的电子饱和速度, 因此平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管能够产生更高的基波振荡频率^[9-10]。之后在 2014 年, 报道了一种沟道长度为 $0.6\ \mu\text{m}$ 的平面 InGaAs 耿氏器件, 其基波振荡频率为 307 GHz, 输出功率为 -16 dBm^[10]。这是目前报道的基波振荡频率最高的平面 InGaAs 耿氏器件。然而输出功率低依然是平面耿氏器件所面临的难题。

本文利用电子束光刻技术制造了一种 InP 衬底上的平面 InGaAs 耿氏二极管, 并对版图和工艺进行设计优化, 设计了 $50\ \Omega$ 共面波导馈电结构作为器件电极, 并且在版图设计时加大了金属电极面积以改善散热效果, 从而提升了平面耿氏二极管的输出功率。当所加电压为 4.4 V 时, 沟道长度和宽度分别为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$ 的器件, 基波

振荡频率为 168.3 GHz, 输出功率为 -5.21 dBm。这是相似振荡频率下, 报道的具有最大输出功率的耿氏二极管器件。这种高功率平面结构耿氏二极管在太赫兹频段具有巨大的应用潜力。

1 工艺制作

制作平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管使用的外延片由中国科学院半导体研究所提供, 利用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术生长。厚度为 600 μm 的 InP 半绝缘衬底上依次生长 300 nm N^- - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 沟道层, 掺杂浓度为 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 200 nm N^+ - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 盖帽层, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。外延材料和器件结构如图 1 所示。

根据工艺线的实际加工能力, 设计了耿氏二极管的工艺流片版图及制作工艺流程, 整个工艺流程主要包括以下步骤:

1) 在 15 mm $\times$ 15 mm 大小的外延片上旋涂电子束光刻胶 PMMA-A4, 之后热板烘烤 180 $^{\circ}\text{C}$ 、2 min。使用 JEOL JBX5500 电子束光刻系统(加速电压 50 keV)曝光器件阴阳电极, 之后用 MIBK/IPA 溶液显影 100 s。电子束蒸发淀积金属 AuGe/Ni/Au, 剥离后退火形成欧姆接触, 退火条件为 340 $^{\circ}\text{C}$ 、30 s。传输线结构测得比接触电阻为 $4.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

2) 使用硫酸系腐蚀液($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$)进行湿法腐蚀制作台阶隔离, 之后淀积 Cr/Au 金属薄膜, 剥离去胶后形成 50 Ω 共面波导馈电结构, 使得器件可以进行射频和直流的在片测试。

3) 最后器件阴阳电极之间的 InGaAs 盖帽层被磷酸系腐蚀液($\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$)腐蚀掉, 露出沟道层。为了良好地控制腐蚀深度, 可以先腐蚀一次后进行直流测试再根据测试情况进行第二次腐蚀, 直到将高掺杂 InGaAs 盖帽层完全腐蚀完毕, 露出低掺杂的 InGaAs 沟道层。

制备的平面 InGaAs 耿氏二极管的扫描电子显微镜照片见图 2, 器件沟道长度为 2 μm , 沟道宽度为 120 μm , 电极间距 20-40-20 μm (50 Ω)。

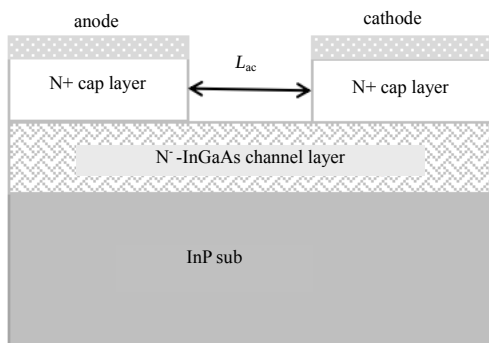


Fig.1 Schematic of material layers
图 1 器件材料结构剖面图

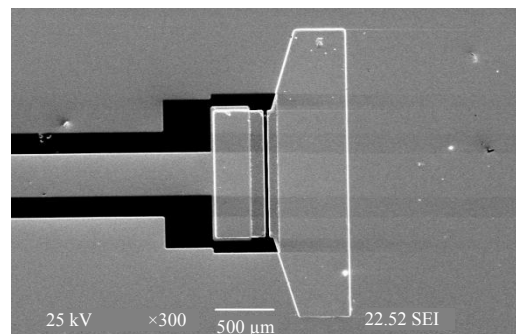


Fig.2 SEM image of a $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ planar Gunn diode
图 2 平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管电镜图片

2 测试

完成综合流片后, 对沟道长、宽分别为 2 μm 和 120 μm 的平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管进行了直流测试和射频测试, 结果如下。

2.1 直流测试

利用 Agilent B1500 半导体分析仪测试了平面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 耿氏二极管的直流特性, I-V 曲线如图 3 所示, 为了减少测试时器件自发热的影响, 使用了脉冲测试的方法, 测试脉冲周期为 200 ms, 宽度为 1 ms。从 I-V 曲线可以看到, 器件显示出了负阻特性, 其阈值电压值为 3.8 V, 阈值电流值为 68 mA。这说明耿氏二极管要开始振荡, 所加电压要大于 3.8 V。

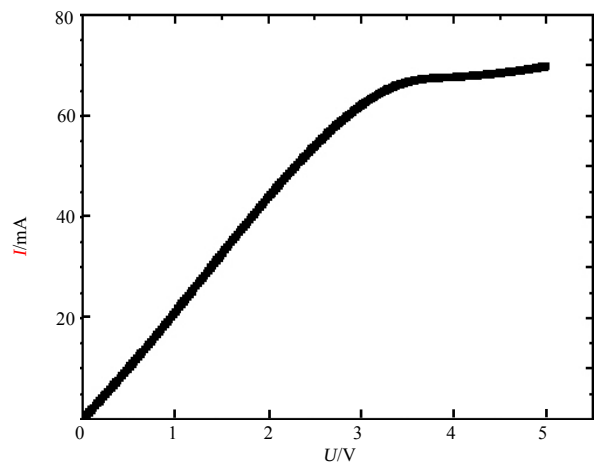


Fig.3 Measured current-voltage characteristics of a typical 2 $\mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ of the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ planar Gunn diode
图 3 直流 I-V 测试结果, 器件沟道长度和宽度分别为 2 μm 和 120 μm

2.2 射频测试

测试平面 InGaAs 耿氏二极管振荡频率的频谱测试系统如图 4(a)所示。测试系统在 Cascade Summit 12000B-M 探针台上进行搭建,包括 D 波段探针(Cascade i170-GSG-100), D 波段混频器(FarranTechnology WHMB-06), 频谱分析仪(R&S FSU67)。RF 探针与混频器相连接,同轴线连接混频器和频谱分析仪,并通过探针 Bias-T 端口给耿氏二极管提供直流偏置。这样频谱分析仪即可通过与耿氏二极管共面波导(CPW)电极相连的 RF 探针,测试出器件产生的振荡信号。

由于所用混频器的变频损耗无法精确获得,为了准确测量平面 InGaAs 耿氏二极管的振荡信号功率,搭建了如图 4(b)所示的功率测试系统。与频谱测试系统相比,测试探针不变,而混频器和频谱分析仪被功率传感器(Virginia Diode, Inc.)和功率计(Erikson PM5)替代。因为 PM5 功率计传感器探头为 W 波段直波导,而采用的探针波导端为 D 波段,所以在两者之间加入了一段渐变波导。前方的 D 波段波导可以将振荡频率在 90 GHz 以下的信号隔离出去,这样整个测试系统就不会检测到 90 GHz 以下振荡信号的功率。通过探针数据表和 PM5 手册上提供的渐变波导损耗,可知整个功率测试系统的损耗为 3.1 dB。

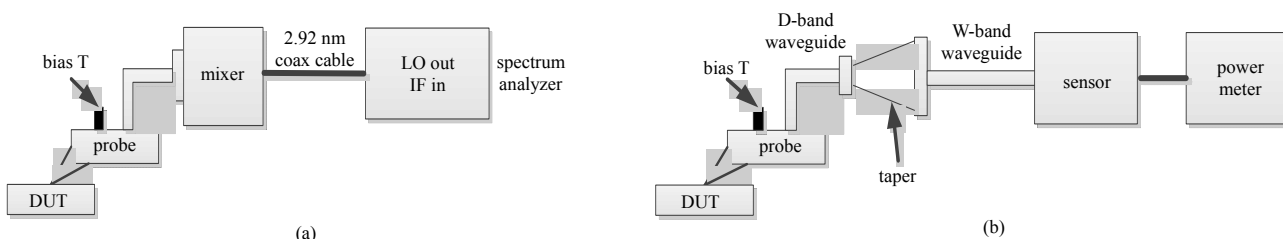


Fig.4 On-wafer (a) spectrum and (b) power analyzer measurement setup for testing planar Gunn diode
图 4 平面耿氏二极管片上(a)频谱和(b)功率测试系统

在测试了振荡频率和功率后,为了进一步确认振荡信号是否为基波振荡频率,用矢量网络分析仪(R&S ZVA 67)及矢网频率扩展件对器件进行小信号测试,频谱范围从 20 MHz~220 GHz。

图 5 为沟道长、宽分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $120\ \mu\text{m}$ 平面 InGaAs 耿氏二极管器件的频谱测试结果,频谱图显示器件振荡频率为 168.3 GHz,此时测试电压点为 4.4 V,电流值 53.7 mA。矢网测试结果显示,在 20 MHz~220 GHz 频率范围内,只有当测试频率大于 166 GHz 时, $|S_{11}|$ 大于 1,这也表明器件基波振荡频率在 168.3 GHz。而功率测试系统测试相同条件下器件的输出功率为 -5.21 dBm。这是相似振荡频率下,报道的具有最大输出功率的耿氏二极管器件。

3 讨论

3.1 耿氏二极管振荡频率

耿氏器件的振荡与耿氏器件材料内部所形成的畴有关。当器件内部的电场强度达到一定值时,便会在其内部形成耿氏畴,这个畴是一个偶极子团,在器件的阴极附近形成,并受到器件内部电场影响进行加速运动,最终到达阳极被吸收^[11]。这个过程便是一次振荡。一个畴被阳极吸收之后,器件内部场强将会变化,这将引起一个新的耿氏畴产生,同样也会经过过渡越到达阳极被吸收。这就是耿氏振荡的内在原因。

所以耿氏器件的振荡频率是由每个畴的产生和吸收之间过程的时间决定,振荡频率的计算公式可以表示为:

$$f = \frac{v_{\text{domain}}}{L_{\text{ac}}} \quad (1)$$

式中: v_{domain} 代表器件中形成的耿氏畴的速度; L_{ac} 代表耿氏畴渡越的距离。对于 InGaAs 材料,畴的速度为 $2.25 \times 10^5\ \text{m/s}$ ^[10],而对于 AlGaAs 材料,畴的速度为 $1 \times 10^5\ \text{m/s}$ ^[7],因此相同器件尺寸下, InP 基耿氏器件要比 GaAs 基耿氏器件的振荡频率高。当 L_{ac} 为 $2\ \mu\text{m}$ 时,带入公式计算器件振荡频率为 112.5 GHz,与测试结果相比偏低。这是由于死区(dead space)的存在使得有效沟道长度减小,即耿氏二极管的振荡频率公式可以修正为:

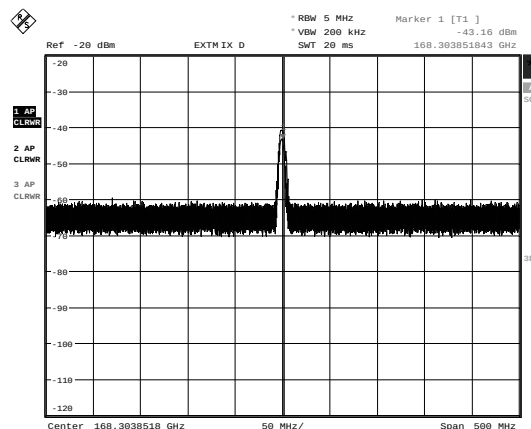


Fig.5 Measured on-wafer spectrum of the planar Gunn diode
图 5 平面耿氏二极管测试频谱图

$$f = \frac{v_{\text{domain}}}{L_{\text{ac}} - L_{\text{dead}}} \quad (2)$$

式中 L_{dead} 是死区的长度^[12]。如果拥有多组不同沟道长度相对应振荡频率的数据,则可以拟合一条直线,从而得到准确的耿氏畴速度和死区长度,这是以后工作的主要内容。

3.2 耿氏二极管输出功率

此次实验制作出具有高输出功率的平面耿氏二极管,归功于对版图和工艺的设计优化。首先使用了 Advanced Design System 2011 仿真软件设计与测试探针相匹配的 CPW(50 Ω)结构,其中地到信号的间距为 20 μm ,中间信号输入端电极宽度为 40 μm ,这样在测试时可以减少功率损耗;其次为了避免器件工作时衬底温度升高而影响器件的输出功率^[13],在版图设计时加大了金属电极面积,并且工艺制作时在外延片背面蒸镀金属,这样都能够改善器件的散热效果。接下来克服 InP 衬底易碎的难题,将衬底减薄,能够继续改善器件的散热效果。

4 结论

利用电子束光刻技术制作出沟道长度为 2 μm 的 InGaAs 平面耿氏二极管。设计了 50 Ω 共面波导馈电结构作为器件电极,并在版图设计时加大了金属电极面积,改善器件的散热效果,从而提升了器件的输出功率。所加电压为 4.4 V 时,器件基波振荡频率为 168.3 GHz,功率为 -5.21 dBm。这是相似振荡频率下,报道的具有最大输出功率的耿氏二极管器件。这种高功率平面结构耿氏二极管可以制作高功率固态太赫兹辐射源,在太赫兹频段的应用中显示出巨大的潜力。

参考文献:

- [1] KEMP M C. Millimetre wave and terahertz technology for detection of concealed threats—a review[C]// The 15th International Conference on Terahertz Electronics. Pasadena,USA:IEEE, 2007(6402):647–648.
- [2] KUKUTSU N,KADO Y. Overview of millimeter and terahertz wave application research[J]. NTT Technical Review, 2009,7(3):1–6.
- [3] MONTANARI A,FORSTER A,LEPSA M I,et al. High frequency investigation of graded gap injectors for GaAs Gunn diodes[J]. Solid State Electronics, 2005,49(2):245–250.
- [4] INIGUEZ-DE-LA-TORRE A,INIGUEZ-DE-LA-TORRE I,MATEOS J,et al. Searching for THz Gunn oscillations in GaN planar nanodiodes[J]. Journal of Applied Physics, 2012,111(11):113705-1–113705-9.
- [5] GARCIA S,INIGUEZ-DE-LA-TORRE I,PÉREZ S,et al. Numerical study of sub-millimeter Gunn oscillations in InP and GaN vertical diodes:dependence on bias,doping,and length[J]. Journal of Applied Physics, 2013,114(7):074503-1–074503-9.
- [6] EISELE H. 480 GHz oscillator with an InP Gunn device[J]. Electronics Letters, 2010,46(6):422–423.
- [7] KHALID A,PILGRIM N J,DUNN G M,et al. A planar Gunn diode operating above 100 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2007,28(7):849–851.
- [8] KHALID A,LI C,PAPAGEOGIOU V,et al. Planar Gunn diodes operating at a fundamental frequency of 164 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013,34(1):39–41.
- [9] FISCHETTI M V. Monte Carlo simulation of transport in technologically significant semiconductors of the diamond and zinc-blende structures[J]. IEEE Transactions on Electron Device, 1991,38(3):650–660.
- [10] KHALID A,DUNN G M,MACPHERSON R F,et al. Terahertz oscillations in an $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ submicron planar Gunn diode[J]. Journal of Applied Physics, 2014,115(11):114502-1–114502-6.
- [11] GROWLEY J D,HANG C,DALRYMPLE R E,et al. 140 GHz indium phosphide Gunn diode[J]. Electronics Letters, 1994,30(6):499–500.
- [12] MOHAMED Ismaeel Maricar,KHALID A,DUNN G,et al. Experimentally estimated dead space for GaAs and InP based planar Gunn diodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2015,30(1):1–5.
- [13] LI Chong. Design and characterisation of millimetre wave planar Gunn diodes and integrated circuits[D]. Glasgow,Scotland: University of Glasgow, 2012.

作者简介：



安 宁(1988-), 女, 河北省邢台市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为太赫兹器件的设计与工艺.email:anning@mtrc.ac.cn.

曾建平(1986-), 男, 成都市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹器件的设计与工艺.

李志强(1986-), 男, 四川省达州市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹器件的设计与工艺.

刘海涛(1988-), 男, 江苏省连云港市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为集成电路设计与测试.

唐海林(1983-), 男, 广西省桂林市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹器件的设计与工艺.

微波电真空器件国家级重点实验室太赫兹器件中心简介

微波电真空器件国家级重点实验室成立于 1992 年, 是国内真空电子学领域唯一的国家级重点实验室, 研究领域主要包括毫米波及太赫兹真空电子器件、毫米波空间行波管、量子频标器件、真空微电子器件、高功率回旋器件以及相关的微波管 CAD 技术、大电流密度阴极技术、微加工技术、新工艺新材料研究等。实验室是真空电子学领域的前沿科学和基础科学研究基地、技术创新和集成创新基地、高水平人才培养基地, 与国内外的高等院校、研究机构和工业部门具有良好的合作关系; 2015 年首次在中国举办了国际真空电子学会议, 在国际真空电子学领域具有重要影响力。

太赫兹器件中心作为实验室总部最重要的研究中心之一, 主要针对太赫兹科学与应用对高性能、实用化辐射源的需求, 承担太赫兹真空电子学创新技术、器件研发和应用基础研究工作, 开展了 94 GHz, 140 GHz, 220 GHz 和 340 GHz 等频段的行波管、返波管、回旋管的研究工作, 开发了带边振荡器、太赫兹行波管谐波放大器等新型太赫兹真空电子器件, 在国内首次将微加工技术应用于太赫兹器件的研发; 承担多项国家科技重大专项、国家重点研发计划、“863”课题、自然科学基金等科研项目, 正在与英国兰卡斯特大学、美国加州大学戴维斯分校联合开发等离子诊断用太赫兹真空辐射源。对折叠波导等周期结构的全色散特性开发开展了系统的研究工作, 研发的 W 波段脉冲行波管功率达到 300 W, 连续波行波管功率达到 50 W; 220 GHz 行波管功率达到 5 W; 120 GHz 带边振荡器功率达到 30 W。

中心具有国际一流的研发平台, 拥有结合云计算和大型模拟软件的高性能精确设计平台和国内唯一的电真空器件专用微加工工艺线, 为解决更高频率电真空器件的实现问题, 正在研究以 UV-LIGA 为代表的电真空器件互作用结构微加工技术和真空微纳技术等。

实验室地址: 北京市朝阳区酒仙桥路 13 号

实验室电话: 010-84352321

邮箱: fengjj@ieee.org