

耿氏管的合金金属及正面反面工艺的研究

白 阳, 贾 锐, 刘新宇, 武德起, 金 智

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 介绍了一种实现低成本、高功率、高散热性能耿氏管的工艺制备流程, 利用分子束外延生长技术(MBE)在高掺杂的 InP 衬底上生长 $n n^+$ 型的一致性掺杂外延结构, 在外延结构正面利用电子束蒸发 Ge/Au/Ni/Au 作为器件阴极和电镀金制备作为散热层, 背面通过化学湿法腐蚀形成台面(MESA)。在不同的温度下进行了退火对比实验, 研究了阴极合金形成良好欧姆接触的温度条件。结果表明: 退火温度为 450 °C 时形成的金属电极的接触效果最好。关于耿氏管的正面反面制备工艺简便易行, 利用 Ge/Au/Ni/Au 制备金属电极得到了良好的欧姆接触性能, 用氯基溶液进行了湿法腐蚀实验得到了较好的垂直台面(MESA)。该制备方法有望实现优良性能的耿氏器件。

关键词: 耿氏管; 太赫兹; 磷化铟; 退火; 合金金属

中图分类号: O73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1265-04

Investigation of the metallization of Gunn diode and process

Bai Yang, Jia Rui, Liu Xinyu, Wu Deqi, Jin Zhi

(The Institute of Microelectronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A practical heat sink fabrication process for low-cost, high-power and millimeter-wave devices was presented. The uniformly doping epitaxial structure ($n n^+$) was grown by molecular beam epitaxy (MBE) on heavily-doped n^{++} InP substrate. Also a batch-fabrication technique for mesas with gold heat sink was proposed. A technology was developed to form ohmic contacts to indium phosphide Gunn diodes, and the metallization of cathode and anode was fabricated by Ge/Au/Ni/Au evaporation, and was annealed at different temperature. Results show that the best ohmic contact is formed at 450 °C. The complete fabrication procedure is described to realize the Gunn devices for low-cost millimeter-wave applications. By the way, wet etching could get approximately vertical MESA structure by HCl-based solution.

Key words: Gunn diode; THz; InP; anneal; metallization

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(2A2011YYYJ-1123)

作者简介: 白阳(1986-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹与耿氏器件系统方面的研究。Email: baiyang@ime.ac.cn

导师简介: 贾锐(1974-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事太赫兹与耿氏器件系统和高效太阳能电池板系统方面的研究。

Email: jiarui@ime.ac.cn

0 引言

人们认识、利用电磁波的频率范围越来越宽,对高频范围波段的波研究日益深入,从而产生太赫兹技术和太赫兹专题项目的研究。太赫兹技术被称为“十大改变未来的技术”之一。目前,已有 100 多个研究组织在进行关于 THz 相关领域的研究,太赫兹波段的电磁波亦被广泛应用于天文、通信、航空、军事、成像、生物制药、化学成分等领域。太赫兹波通常指频率为 0.1~10 THz 的电磁波,也有人认为是频率为 0.3~3 THz 的电磁波。它具有很强的穿透性,可以穿透非金属和非极性材料,如纺织品、塑料、纸板、木料等包装物,还能穿透烟雾和浮尘。大量星际分子的特征谱线在太赫兹范围^[1]。太赫兹波能量低,不会引起生物组织的光离化,适合于生物医学成像^[2]。

太赫兹技术主要应用在成像、物质分析和通信三个方面。太赫兹成像技术分为主动成像和被动成像,主动成像需要一个太赫兹源发出特定频段的太赫兹波,接收反射波并通过电脑计算成像。主动成像可用于检查物质内部的缺陷,目前已在航天材料检查和药品检测中做了一些实验和应用,且目前的安检成像设备大部分是利用主动成像技术^[3];被动成像是接收空气中或物体本身发出的太赫兹波并成像。在物质分析方面主要是利用太赫兹源发射一定的连续波,根据样品的化学成分和分子结构对太赫兹波的吸收率不同而呈现不同的谱线,通过和已有的太赫兹的光谱数据库相比较^[4-7]得到物质的成分,且目前已在大学实验室和机场等重要场合的安检中使用。在通信方面,2008 年奥运会期间曾使用远程 1 km 以上的远距离信息传递,最大速度可达 10 Gbps。

文中利用正面腐蚀圆环作为对准沟槽、背面减薄的方法蒸发 Ge/Au//Ni/Au 作为电极,进行制备 InP 耿氏管的研究,阐述了耿氏二极管外延结构设计、工艺流程和电极金属及退火温度。对阴极合金所形成的欧姆接触进行了不同温度下的退火对比实验,同时利用 HCl:H₃PO₄ 溶液作为湿法腐蚀剂,腐蚀形成方面(MESA),在扫面电镜(SEM)下观察,有良好的垂直侧壁,腐蚀度均匀。

1 耿氏管的工艺

在干净的 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 掺杂 S 元素的 InP 衬底上,利用 MBE 生长外延结构,包括 n⁺的缓冲层和 n 型作用层。整个工艺中,阴极的作用界面区会形成深度耗尽层、低势垒非欧姆接触的接触使。这样的结果阴极耗尽,管子工作在稳定耗尽层模式下,会对电流有一定的限制,能有效保护做出的耿氏管,提高其击穿电压,并且其振荡频率特性主要由稳态耗尽层决定。MBE 的生长顺序:1.5 μm n⁺型 InP 的缓冲层,其掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 然后是生长作用层,其厚度为 1.8 μm ,掺杂浓度为 $1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。nn⁺结构的二极管相比于传统的 n⁺nn⁺结构,展现出更低电流密度、更高输出功率和在温度变化时优越的频率稳态性^[8],其结构如图 1 所示。

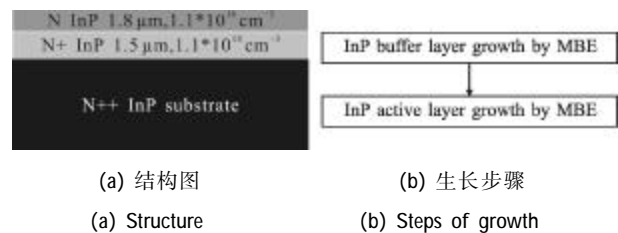


图 1 耿氏二极管的结构

Fig.1 Structure of Gunn diode

文中 InP 耿氏二极管的结构与制备步骤如图 2 所示。首先在干净的 InP 衬底上生长外延结构,利用光刻胶(PR)9 920 光刻出一定宽度的圆环图形,然后在这个面(正面)湿法化学腐蚀。使用氯基(HCl-based)的腐蚀剂,腐蚀剂为 H₃PO₄:HCl:H₂O(4:1:3)混合物刻蚀剂,刻蚀剂速率为 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$,刻蚀时间为 15 min,刻蚀深度 9 μm 。由于氯基腐蚀剂为各向异性,在某个方向上腐蚀速率比较快,同时刻蚀的侧壁变现出等方特性,刻蚀后沟的宽度比做完光刻后形成的沟要宽,约为 10 μm ,且腐蚀后侧壁有一定坡度,使腐蚀后图形有些椭圆化。

阴极欧姆接触蒸发金属在清洁、腐蚀后的上表面,蒸发特定金属层 Ge/Au/Ni/Au(500/900/300/1 600 \AA)(1 \AA =0.1 nm) 作为阴极的欧姆接触。分别在 370 $^{\circ}\text{C}$ 、410 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ ^[9-10]进行了退火实验。文中对耿氏管阴极需要形成良好欧姆接触的退火温度进行了一定的研究。

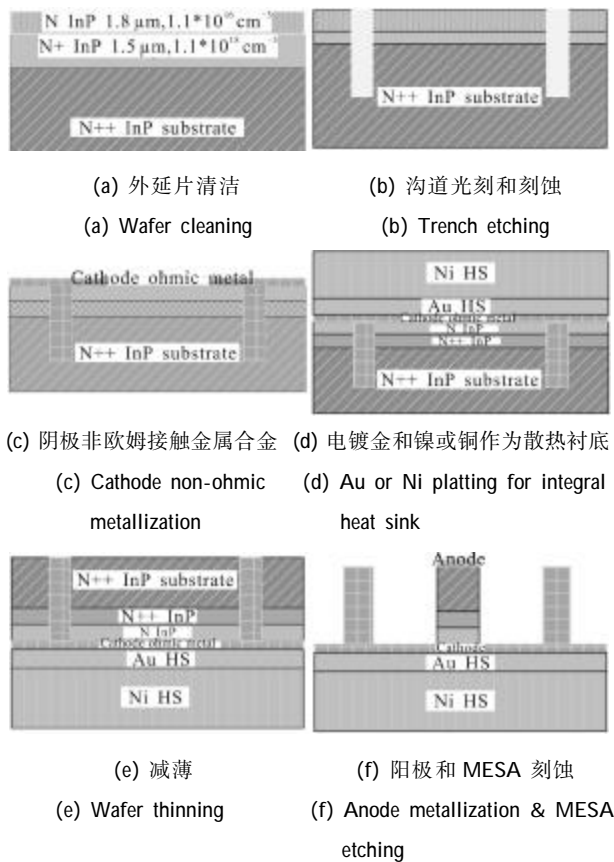


图 2 InP 耿氏二极管的结构与制备步骤
Fig.2 Process of InP Gunn diode

在去除光刻胶之后(PR),电子束蒸发欧姆接触层 Au/Ge/Ni/Au(500/900/300/1 600 Å),且退火 370 °C, 60 s。金电镀作为整块散热衬底(IHS),金板通过的直流电流密度为 3 mA/cm²,电解液温度为 60 °C, 3 min, 且金的厚度为 3 μm。为了形成 HIS, 要让金填充到沟,如图 3 所示。此时能看到氯基溶液腐蚀效果,不同方向的腐蚀速率有较明显的差异,横向腐蚀速度较慢,纵向腐蚀速度较快。再电镀镍或铜,实验中选择电镀镍金属,镍板通过的电流密度为 35 A/cm²,电解液温度为60 °C,形成的镍金属层厚约为 60 μm。然后

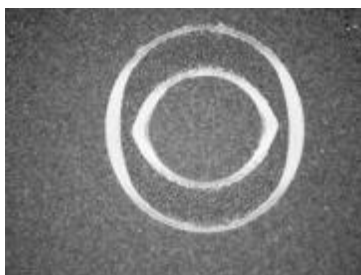


图 3 电镀金后的凹槽
Fig.3 Trench plating

晶圆片背面机械减薄磨光,让晶圆片和外延结构厚度减薄到 40 μm,利用氯基溶液进行腐蚀,直到可以观察到电镀金。减薄后外延层的厚度为 10 μm。进行一定抛光,晶圆片厚度的一致性可以提高,因为电镀金比 InP 晶圆片被研磨掉的少,而控制沟的深度比控制减薄衬底的厚度更方便。

在晶圆片减薄后,衬底背面进行光刻,所制备的阳极其形状为特定尺寸的圆形,通过电子束蒸发,在阳极形成同样金属和厚度的电极,如图 4 所示。这样制作出的耿氏二极管性能一致性会提高。阳极电子束蒸发金属和阴极相同,但退火温度要低一些。



图 4 阳极金属合金
Fig.4 Metallization of anode

最后进行 MESA 刻蚀。利用准备好的湿法化学腐蚀,用氯基腐蚀剂溶液形成 MESA,如图 5 所示。最终隔离耿氏器件,进行封装。

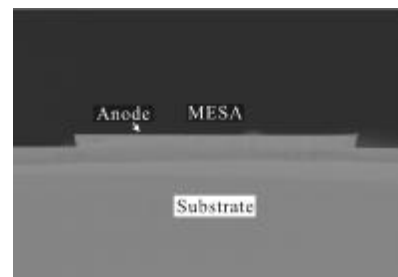


图 5 腐蚀的柱台
Fig.5 MESA

2 耿氏管电极退火温度测量结果

在 370 °C、410 °C、450 °C退火温度下,利用 TLM 图形测欧姆接触实验对蒸发的 Ge/Au/Ni/Au (500/900/300/1 600 Å)进行分析。TLM 图形为 12 个圆环图形,内圆环的直径为 100 μm,与外圆环的间距为 10~120 μm,在 0.1 V 的直流电压下测量每个温度下的图形电流,测量了多组数据来取均值电流,实验结果如图 6 所示。

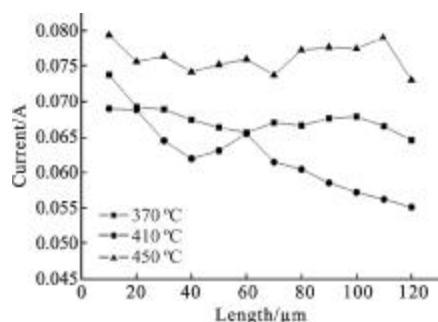


图 6 不同退火温度的电流值对比

Fig.6 Comparing with the current of different temperature

电流值主要由 3 个电阻决定:两个欧姆接触的接触电阻和 InP 材料的体电阻,即掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的方块电阻,耿氏管的体电阻是相同的,两个接触电阻是在完全相同条件下退火形成的,理论上是相同的。图 6 是多次测量所得结果的均值图,可以看出,阳极的退火温度在 450°C 的欧姆接触较好,比 410°C 和 370°C 的电流要高,所实现的欧姆接触的接触电阻明显要低。 370°C 下形成的欧姆接触的接触电阻比 410°C 稍低一些。耿氏管的工作原理是在阴极产生偶极子,经过渡越区将会被阳极吸收。若阴极的欧姆特性较好,其电流增大,耿氏管的功率会随之增大。

在不同温度下退火,表面所呈现的颜色有所不同: 370°C 的实验片表面为金色, 410°C 的实验片表面为金色略白, 450°C 的实验片表面为白色加稍微的淡金色。

为了保证耿氏管的稳定性及工艺的一致性,在阳极一侧所用的电极金属与阴极相同,蒸发的电极厚度相同,但为了不影响阴极的欧姆接触电极,退火温度要低于阴极的退火温度。阳极一侧 InP 的掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} ,会使退火后所形成的接触存在一个低势垒,使耿氏管工作在稳态下,如图 7 所示,这样对管子有一定保护作用,同时会提高击穿电压。

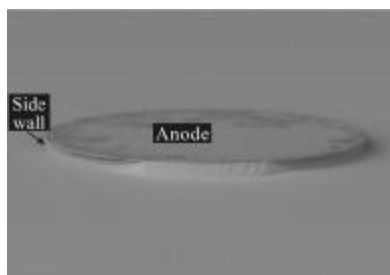


图 7 电镜下的耿氏管

Fig.7 Gunn diode on SEM

3 结论

InP 耿氏管可作为毫米波与亚毫米的信号源,且有着自身的优秀特性,可应用于太赫兹领域。与阳极相接触的一侧掺杂浓度较低,经过退火实验后,器件内部形成一个较低的势垒。 n^+n 结构的外延层使耿氏管限流,并工作在稳态模式下。对于电极的选取,Ge/Au/Ni/Au 作为一种新型的蒸发金属电极的合金被提出,并在 370°C 、 410°C 、 450°C 进行了退火实验。实验结果表明 450°C 时阴极的欧姆接触效果较好,该研究会耿氏管的研究做出一定有益的贡献。文中的工艺在镀金方面加以改善,实现了低成本的耿氏毫米波器件。

参考文献:

- [1] Yao Jianquan, THz technology and application prospect [R]. COEIC2008, 2008. (in Chinese)
- [2] Michael Gaskill, David Headland. Department of electrical engineering and electronics [R]. UMIST Fourth Year Project Interim Report, 2003.
- [3] Yao Jianquan, Lu Yang, Zhang Baigang, et al. New Research of THz Radiation[J]. Chin Phys Lett, 2005, 22(12): 3176-3178. (in Chinese)
- [4] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. THz Science and Technology and Application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
- [5] Carr G, Martin M, McKinney W, et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons [J]. Nature, 2002, 4(20): 153.
- [6] Kim M R, Lee S D, Lee J S, et al. Improvement of fabrication technology[C]//GSM 2008 Proceeding, 2008.
- [7] Liu J Q, Zybur M F, Pao Y C. Dry etching process in InP gunn device technology, utilizing inductively coupled plasma (ICP): System [C]//Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 1998: 11-15.
- [8] Morais J, Fazan T A, Landers R. Ohmic contacts formation on n-InP [J]. Appl Phys, 1996, 79(9): 1.
- [9] Wen Changhuang, Tan Fulei, Chung Lenlee. AuGePt ohmic contact to n-type InP [J]. Appl Phys, 1996, 79(12): 15.
- [10] Wei Peng, Zhu Yaoming, Deng Honghai, et al. Low resistance ohmic contacts to p-InP of mesa-isolated InP/InGaAs PIN photovoltaic detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2309-2313. (in Chinese)