

# 氮化镓基射频及太赫兹器件开发及应用

颜伟

(中国科学院半导体研究所, 北京 100084)

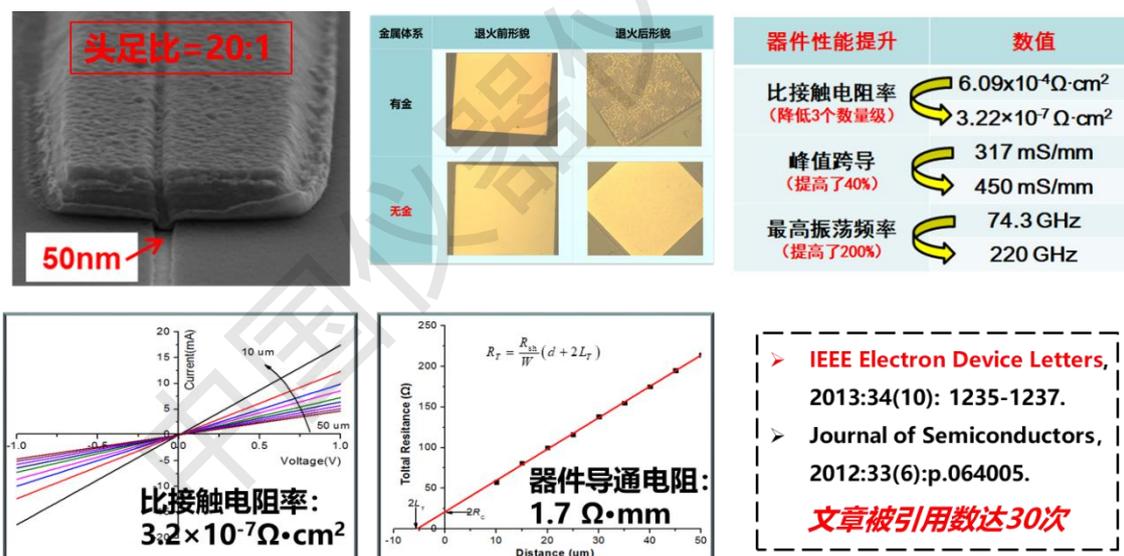
**摘要:** 作者长期致力于氮化镓基射频及太赫兹器件的研发和制备。本案例简要介绍了射频晶体管 and 太赫兹探测器的关键技术研究, 为相关领域做出了卓越的贡献。

**关键词:** 射频晶体管; 太赫兹探测器

## 1 专业技术成果介绍

### 1.1 GaN HEMT 射频晶体管关键工艺研究

通过开发二次图形转移工艺和多步退火工艺, 将 GaN HEMT 器件的栅长缩短至 50nm (T 型栅栅足比高达 20:1), 器件比接触电阻率降低 3 个数量级, 器件的高频性能提升 3 倍。根据这两项技术发表的文章, 被引用次数达到了 30 次。

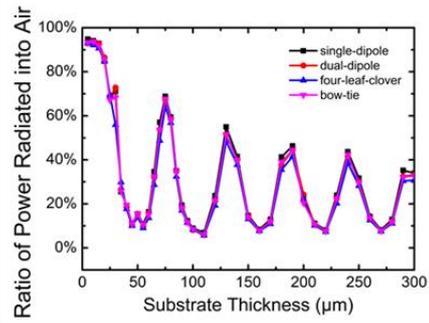
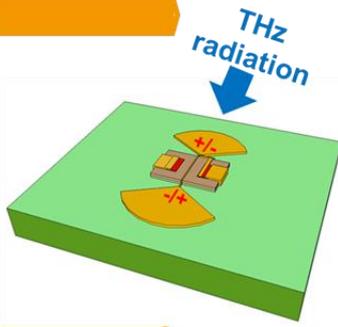


### 1.2 GaN HEMT 太赫兹探测器关键技术研究

在国际上首次揭示了器件的探测响应度随衬底厚度增加呈周期性振荡, 这个规律为后续太赫兹探测器的设计提供了重要参考, 该成果发表在一区期刊上面; 通过集成阻抗匹配的天线结构, 最终制备的 GaN HEMT 探测器响应度超过 4000V/W, 性能国内领先。

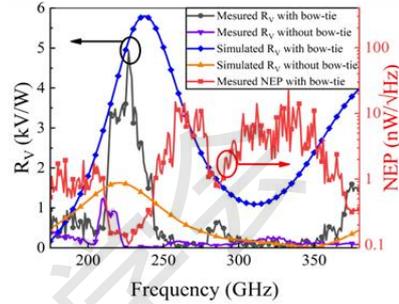
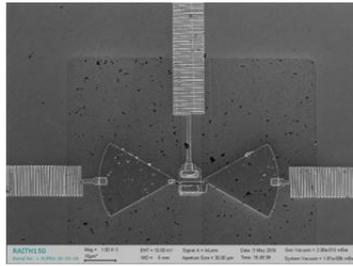
## 衬底效应

- ✓ 国际首次揭示探测器响应度随衬底厚度增加呈周期性振荡



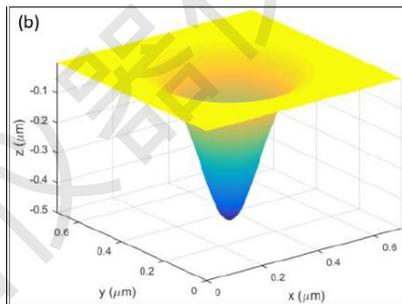
## 天线设计

- ✓ 集成阻抗匹配蝶形天线, 器件响应度超过4kV/W



利用聚焦离子束刻蚀在制备纳米尺度圆锥/斜圆锥结构

圆锥或者斜圆锥结构可以用在太阳能电池中作为陷光结构。



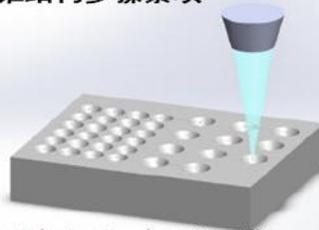
在硅片上利用常规工艺制备纳米尺度圆锥结构是非常困难的, 不仅工艺步骤繁琐, 而且很难得到形貌良好的圆锥结构。具有特定角度的斜圆锥结构则更加难以制备。于是我决定尝试利用利用 FIB 来制备这种圆锥结构。聚焦离子束系统可以使用 Ga 离子束直接在衬底上刻蚀图形, 这样就会大大节省了工艺步骤。

### 工艺难点:

- 使用常规光刻刻蚀工艺制备纳米尺度圆锥结构步骤繁琐
- 很难得到形貌良好的圆锥形貌
- 很难制备斜圆锥结构

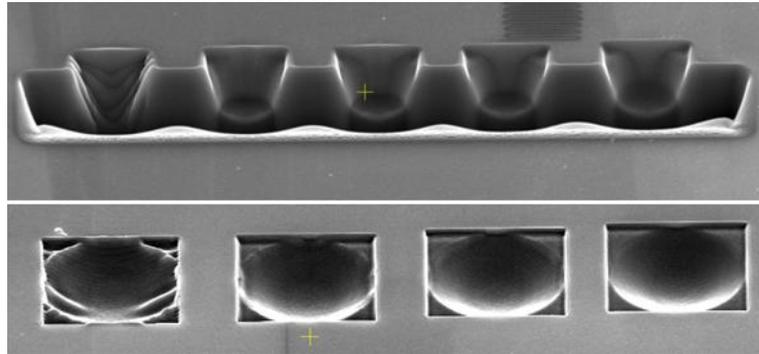


Si Substrate

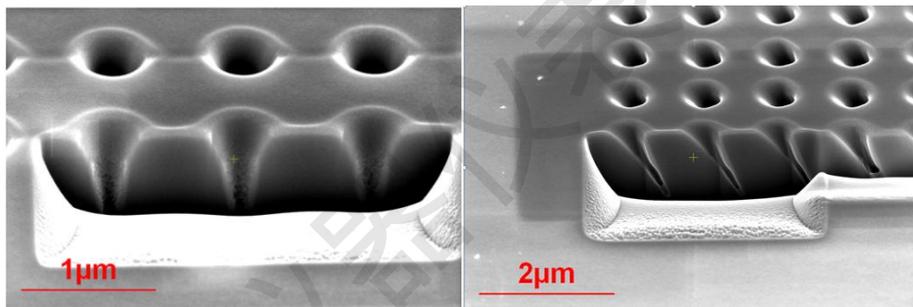


Direct Fabrication by FIB milling

但是采用普通的 FIB 灰度刻蚀工艺，制备出来的圆锥结果，底部是平的或者是弧形，很难得到真正的圆锥形貌。



经过长时间探索，我发现可以利用 FIB 离子束是一个高斯束的性质，采用单像素刻蚀，可以制备出形貌良好的圆锥结构。我可以通过改变离子束的束流和刻蚀时间，来控制圆锥的尺寸和深度。通过选择样品台的角度就是制备任意倾角的斜圆锥结构。最终利用 FIB 成功在硅衬底上制备出纳米尺度圆锥/斜圆锥结构，如下图所示。



### 1.3 SOI 衬底纳米硅光技术开发

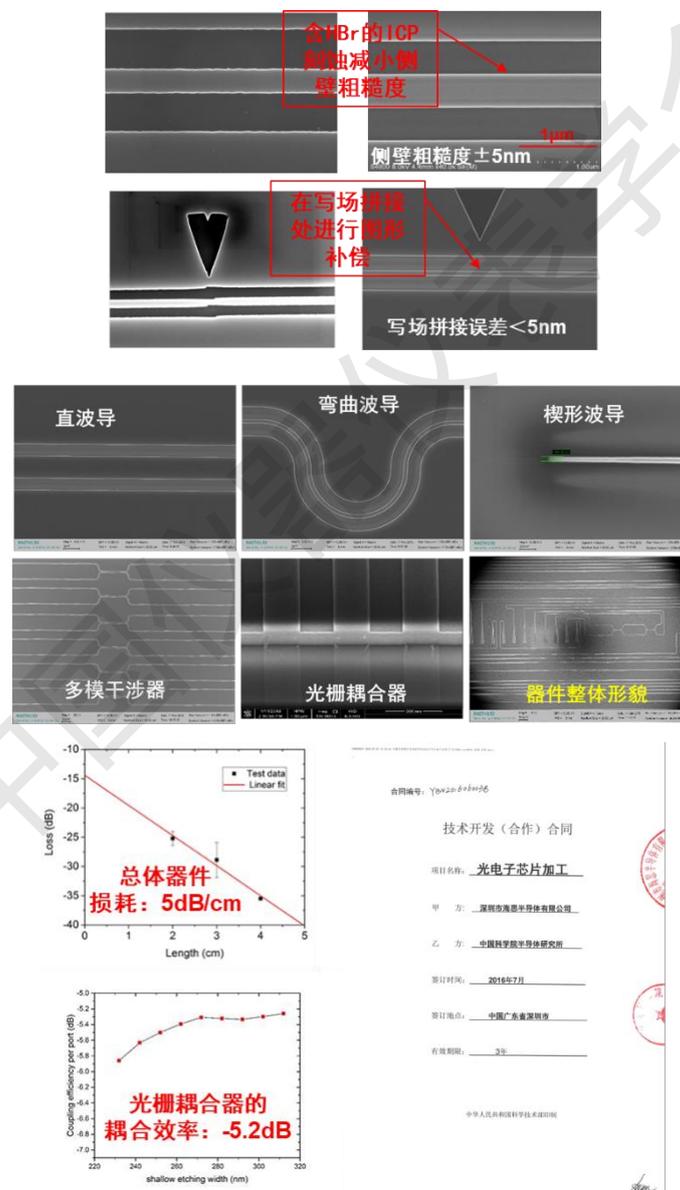
除了利用设备进行工艺开发之外，我还利用集成中心的产线优势，对各步工艺进行整合，积极进行技术开发。其中一个典型案例就是华为海思委托中心进行的 SOI 衬底纳米硅光技术开发，主要是开发通信系统中所需要的某些光学器件。

硅光技术是近些年比较流行的通讯解决方案，硅光技术首要难题是降低由加工粗糙度带来的器件损耗。具体的工艺挑战有以下几点：对波导侧壁粗糙度，写场拼接误差，器件尺寸，套刻精度要求非常苛刻，因为器件面积大，所以对样品表面洁净度也要求非常高。

因为要求苛刻所以硅光技术一般都是在 fab 厂中进行代工，在 fab 厂中代工对各项参数要求比较多，周期也会比较长，不易于研究者进行前期参数迭代。所以海思和集成中心进行合作，想看看在集成中心是否也能完成硅光技术所需的核心器件。

最后通过长时间的摸索，利用高电压电子束曝光，高刻蚀选择比电子束胶，结合带有 HBr 气体的 ICP 成功地减小波导侧壁的粗糙度，再利用版图的图形补偿减小了写场拼接处的

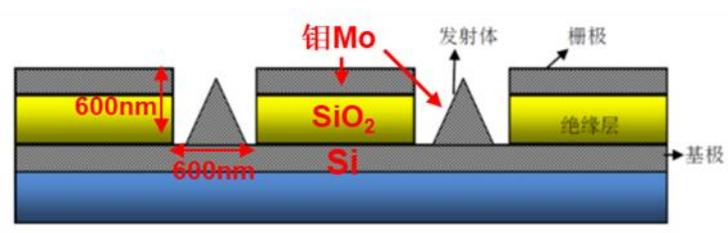
拼接误差。中心通过 4 个批次的加工，制备的光栅耦合器波导：波导实测宽度为 415-457 nm（设计宽度 450nm）；臂长差实测 14.29  $\mu\text{m}$ （设计长度 14.75  $\mu\text{m}$ ）；耦合区宽度 199 nm（期望宽度 200 nm）；光栅浅刻宽度 292.9 nm，周期 624.3 nm（设计值分别为 292 nm 与 634 nm）。经测试三批流片波导损耗均在 5 dB/cm 左右，目前业界最好的水平在 1.7dB/cm 左右，业界的平均水平在 3dB/cm 左右。光、电性能的稳定性和一致性较好，芯片经过 5 个月的高密度测试仍能保持较好的一致性。本项目制备的原型芯片实现了华为期望的验证目标。因此，我圆满完成了华为公司委托的光电子芯片加工项目。证明了集成中心在硅光技术方面的加工能力。



#### 1.4 高集成度钨尖冷阴极制备技术开发

Spindt 冷阴极是最适于微波真空电子器件的场发射阵列，这个工艺的过程在 Si-绝缘

层-金属这样一个三明治衬底结构中，先制备一个密集纳米孔阵，然后再在这些孔阵中制备出特定弧度的纳米金属针尖。既要保证纳米针尖与衬底附着牢固，在后续工艺和使用中不脱落，又要保证纳米针尖不和侧壁和栅极粘连，形成短路。



Spindt 冷阴极的集成度越高，发射电流密度就越大，目前国内制备 Spindt 冷阴极一般采用普通光刻，集成度在  $10^6$  tips/cm<sup>2</sup> 数量级，达不到场发射的标准。所以中心尝试使用电子束曝光来提升 Spindt 冷阴极的集成度。

通过技术研发，我分别攻克了金属溅射工艺，高精度 EBL 密集圆孔图形转移工艺；在此基础上，我开发了双向金属蒸发工艺，成功制备了高集成度钼尖冷阴极。其集成度达到  $2.5 \times 10^7$  和发射电流达到 196 A/cm<sup>2</sup>，均为国内领先，并且成功完成了中物院委托的技术开发项目。

冷阴极关键参数	本工作	国内	国际
集成度(tips/cm <sup>2</sup> )	$2.5 \times 10^7$	$< 10^6$	$10^9$
最大电流发射密度(A/cm <sup>2</sup> )	196	$< 10$	1600

## 2 专业技术人才介绍

### 2.1 个人简介

颜伟，男，1984 年出生。中国科学院半导体研究所高级工程师，博士。2007 年南开大学物理学院获学士学位，2013 年毕业于中科院半导体所并获得工学博士学位，之后在半导体所集成技术工程研究中心工作至今。主要研究领域有：氮化镓基射频及太赫兹器件等。近年来作为课题负责人承担国家自然科学基金面上项目 1 项，青年基金项目 1 项；作为子课题负责人承担科技部重点研发项目 1 项；作为项目骨干或一般人员参与科研项目 6 项。2016 年参加了在波兰举行的国际联合实验室太赫兹技术研讨会并做了分会报告。发表国内外论文 20 余篇。申请专利 9 项，其中授权专利 7 项。

在半导体所所级中心主要从事公共服务及相关技术开发工作。负责了近 10 台套设备的管理培训和加工服务工作，为所内外用户提供半导体微电子/光电子器件及芯片的加工制备和测试表征服务。负责的设备总价值超过 3000 万元，年均收入超过 200 万元，培训用户过

百名，2019 年荣获北京信息电子技术大型仪器区域中心“年度优秀个人”称号。

## 2.2 专业技术研究方向

氮化镓基射频及功率器件

氮化镓基太赫兹探测器

半导体微电子/光电子器件及芯片工艺制备和测试技术，包括但不限于：光刻、电子束曝光，刻蚀、淀积、FIB、退火，射频及太赫兹测试等等。

半导体器件设计、制备工艺开发、流程整合。

## 2.3 承担科技项目及代表论著

近五年内在所级中心负责的项目					
序号	项目名称	项目类型	起止年	担任角色	
1	侧栅结构氮化镓基高电子迁移率晶体管太赫兹探测器共振探测研究	自然科学基金/面上项目	2020-2023	项目负责人	
2	高电子迁移率晶体管太赫兹探测器的天线匹配设计与探测机理研究	自然科学基金/青年基金	2016-2018	项目负责人	
3	蓝光 LD 材料与器件生产示范线	国家重点研发计划	2018-2022	子课题负责人	
近五年内发表的代表性论文					
序号	论文题目	期刊名称	作者身份	时间	DOI
1	High-Responsivity, Low-Leakage Current, Ultra-Fast Terahertz Detectors Based on a GaN	Sensors	唯一通讯	2022	<a href="https://doi.org/10.3390/s22030933">https://doi.org/10.3390/s22030933</a>
2	Modelling effects of GaN HEMTs terahertz detectors with spiral antennas	Applied Optics and Photonics China 2021	共同通讯	2021	10.1117/12.2603258
3	平面天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用	中国光学	共同通讯	2020	10.3788/CO.20201301.0001
4	Progress of Waveguide Ring Resonators Used in Micro-Optical Gyroscopes	Photonics	共同通讯	2020	10.3390/photonics7040096
5	Analysis of Substrate Effect in Field Effect Transistor Terahertz Detectors	IEEE J SEL TOP QUANT	共同通讯	2017	10.1109/JSTQE.2016.2633865
6	An Effective Method for Antenna Design in Field Effect Transistor Terahertz Detectors	J INFRARED MILLIM W	共同通讯	2018	10.11972/j.issn.1001-9014.2018.04.002

7	Millimetre Band Detectors Based on GaN/AlGaN HEMT	2018 22nd MIKON	共同通讯	2018	10.23919/MIKON.2018.8405292
---	---	-----------------	------	------	-----------------------------

## 2.4 获奖及荣誉

近五年内除学术论文外的其他成果和奖励				
序号	成果类别	成果和奖励相关信息	产出年份	排名或贡
1	获奖	北京信息电子技术大型仪器区域中心： 年度“优秀个人”	2019	1
2	授权专利	太赫兹波探测器。授权专利号：ZL 201510029446.1	2017	2
3	授权专利	一种 GaN 基异质结二极管及其制备方法。授权 专利号：ZL.201711346622.X	2021	5
4	授权专利	气体传感器及其制备方法。授权专利号： ZL.201811606056.6	2020	4
5	授权专利	压电 MEMS 解耦结构及 MEMS 陀螺仪。授权 专利号：ZL.201811529259.X	2020	6
6	授权专利	盖板结构及其制作方法、电容式传感器。授权 专利号：ZL.201811579463.2	2020	7