



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113889411 B

(45) 授权公告日 2023. 11. 14

(21) 申请号 202111076539.1

(22) 申请日 2021.09.14

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113889411 A

(43) 申请公布日 2022.01.04

(73) 专利权人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

专利权人 北京科技大学顺德研究生院

(72) 发明人 魏俊俊 刘思彤 张钦睿 李成明

刘金龙 陈良贤 高旭辉

(74) 专利代理机构 北京市广友专利事务所有限

责任公司 11237

专利代理师 张仲波

(51) Int. Cl.

H01L 21/335 (2006.01)

H01L 29/778 (2006.01)

H01L 29/10 (2006.01)

H01L 23/373 (2006.01)

H01L 23/367 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 102244051 A, 2011.11.16

CN 111564501 A, 2020.08.21

CN 111785610 A, 2020.10.16

CN 112164976 A, 2021.01.01

CN 209312750 U, 2019.08.27

JP 2009218370 A, 2009.09.24

KR 20090029905 A, 2009.03.24

TW I677108 B, 2019.11.11

US 2015364591 A1, 2015.12.17

审查员 唐朝东

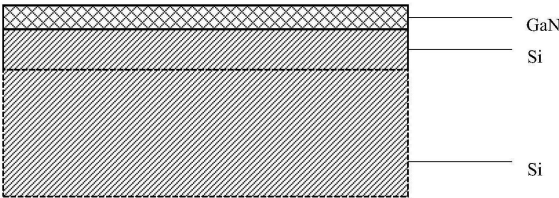
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种带金刚石微柱阵列的金刚石基GaN材料  
制备方法

(57) 摘要

一种带金刚石微柱阵列的金刚石基GaN材料制备方法,属于半导体技术与电子器件散热领域。实施步骤为五步,包括:GaN原始硅衬底减薄,硅衬底构建微孔,微孔底部镀至介质层,沉积金刚石微柱阵列,金刚石生长面研磨。最终完成带金刚石微柱阵列的金刚石基GaN材料制备。本发明保留原始衬底的主体结构,显著抑制了制备的GaN-on-Diamond晶圆的形变,且不需要反复使用临时载体,可操作性强,通过不连续的结构设计,缓释了由于热膨胀系数失配带来的热应力累积,减小了GaN性能衰减程度,对GaN的保护更全面。采用金刚石与原始衬底硅交替排列的方式及微柱阵列结构,晶格错排和畸变程度降低,增大了导热面积,大幅提高了散热效率,能满足先进电子技术对封装散热材料的要求。



1. 一种金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于具体制备步骤如下:

步骤1,GaN原始硅衬底减薄:采用研磨减薄或者等离子刻蚀的方式,对GaN原始衬底进行减薄;所述原始硅衬底减薄后,剩余厚度大于等于 $50\mu\text{m}$ ;

步骤2,硅衬底构建微孔:采用光刻掩膜技术,在减薄后的硅衬底表面构建金属图形掩膜;对覆盖有金属图形掩膜的硅衬底进行刻蚀,刻蚀位置选择在GaN芯片热点下方,获得刻蚀后的具有一定深宽比的微孔结构;所述硅衬底上的微孔深宽比应小于等于0.5,但不包括0,以实现金刚石在微孔内部的稳定致密生长;

步骤3,微孔底部镀至介质层:采用物理气相沉积或化学气相沉积法,在GaN原始硅衬底微孔底部及侧面,镀制 $\text{SiN}_x$ 过渡层;

步骤4,沉积金刚石微柱阵列:采用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)工艺,镀至介质层后的微孔内沉积金刚石,使得硅衬底微孔内及硅衬底其它区域全部覆盖完整金刚石层;

步骤5,金刚石生长面研抛:采用机械研磨抛光方法,对完成金刚石微柱阵列沉积的金刚石膜表面进行平整化。

2. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,所述硅衬底构建微孔,微孔尺寸及位置的设计以GaN功率器件发热源为参考,微孔刻蚀位置处于芯片热点正下方,且微孔尺寸大于芯片热源尺寸。

3. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,所述硅衬底构建微孔,微孔结构内部需完全去除微孔内的硅衬底,直到GaN薄膜的N面区域。

4. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,所述硅衬底构建微孔方法采用ICP、RIE选择性刻蚀方法。

5. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,微孔底部镀制一层介质层,介质层材质是 $\text{SiN}$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{SiC}$ 。

6. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,沉积的金刚石微柱阵列,金刚石微柱完全填充步骤2中所述硅衬底微孔,并延续到外侧;金刚石微柱高度大于等于 $50\mu\text{m}$ ,金刚石整体厚度大于等于 $100\mu\text{m}$ 。

7. 如权利要求1所述金刚石微柱阵列的GaN半导体结构的制备方法,其特征在于,沉积的金刚石微柱阵列与步骤2中残留的硅衬底,同时构建金刚石微柱阵列网络结构散热衬底层。

## 一种带金刚石微柱阵列的金刚石基GaN材料制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种带有金刚石微柱的GaN半导体结构,特别是提供一种通过制备金刚石微柱阵列,提升GaN晶圆散热能力的结构及其制备方法。属于半导体技术与电子器件散热领域。

### 背景技术

[0002] 氮化镓(GaN)作为继Si和GaAs之后的第三代半导体材料,具有禁带宽度大(室温下为3.39eV)、击穿电场强度高(3.3MV/cm)、饱和电子速度大( $2.5 \times 10^7$  cm/s)以及抗辐射能力强等特点。在白光LED、短波长激光器、紫外探测器以及高温大功率器件等领域均具有极高的应用价值和发展前景。

[0003] 随着技术的不断发展,GaN HEMT器件的散热问题已成为制约器件性能提升的关键瓶颈,而热耗散能力又主要由器件的衬底材料决定。在现有的GaN半导体结构或器件制造中,通常是以SiC或Si为衬底进行GaN的异质外延。然而由于GaN与SiC、Si衬底间的晶格失配和热失配,会导致异质外延GaN薄膜中具有高的位错密度,位错会形成非辐射复合中心和光散射中心,大大降低光电子器件的发光效率。除此之外,二者热导率( $40 \sim 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )较低,在散热方面能力不足,进而限制了GaN器件性能的提高。

[0004] 金刚石是自然界中已知热导率最高的材料,同时其具有非常稳定的物理和化学性能,金刚石可以有效地从GaN晶体管中最热的位置提取热量,与使用标准的SiC基GaN功率放大器相比,金刚石基GaN(GaN-on-Diamond)器件可承受更大功率、更高频率,能够有效解决困扰GaN功率器件性能提升的散热问题,并可在相同尺寸下制造具有更大功率密度的GaN基功率器件。目前构建GaN-on-Diamond的方法主要有两种,金刚石与GaN HEMT的结合,最直接的途径是在金刚石衬底上外延GaN外延层,然后进行GaN HEMT的制备。然而,GaN与金刚石在具有很大的晶格失配和热失配,外延生长的温度通常在1000℃以上,这也成为金刚石衬底上进行GaN异质外延主要难点。除此之外,基于转移技术的GaN HEMT是另外一种将金刚石与GaN结合起来的方法,其技术途径是将未进行任何工艺的GaN外延层或者已完成器件工艺的GaN外延层从Si或SiC等衬底上剥离下来并转移到金刚石衬底上。然而转移后的高温环境冲击以及生长时的应力失配问题还无法得到有效解决。

[0005] 专利CN107731903A公开了一种金刚石复合衬底的GaN高电子迁移率器件及制作方法,用于解决传统GaN高电子迁移率在高温大功率工作条件下性能退化的问题。但金刚石散热层与GaN层之间还存在硅层,导热效率还有待提升。专利CN109390445B公开了一种基于转移技术的N面GaN外延结构的制作方法,然而N面在器件制备与封装中使用率远低于Ga面,实用场景受到局限。而本文采用金刚石微柱阵列结构,作为GaN晶圆的散热通道,既能实现金刚石对GaN的近结散热效果,同时又尽量避免破坏GaN原有应力及结构匹配特性,能够实现GaN半导体器件散热与性能协同强化的效果。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种具有金刚石微柱阵列散热结构的金刚石基氮化镓材料制备方法。本方案能够充分利用金刚石微柱阵列网络分布结构,提高导热效率和冷却能力,用于解决目前传统GaN半导体结构中衬底热失配、低热导率所带来的散热瓶颈问题。

[0007] 参照图1,本发明的具体实施步骤为:

[0008] 步骤1,GaN原始硅衬底减薄:采用研磨减薄或者等离子刻蚀的方式,对GaN原始衬底进行减薄,如图1A所示;

[0009] 步骤2,硅衬底构建微孔:采用光刻掩膜技术,在减薄后的硅衬底表面构建金属图形掩膜;对覆盖有金属图形掩膜的硅衬底进行刻蚀,刻蚀位置选择在GaN芯片热点下方,获得刻蚀后的具有一定深宽比的微孔结构,如图1B所示;

[0010] 步骤3,微孔底部镀至介质层:采用物理气相沉积或化学气相沉积法,在GaN原始硅衬底微孔底部及侧面,镀制 $\text{SiN}_x$ 过渡层,如图1C所示;

[0011] 步骤4,沉积金刚石微柱阵列:采用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)工艺,在镀至介质层后的微孔内沉积金刚石,使得硅衬底微孔内及硅衬底其它区域全部覆盖完整金刚石层,如图1D所示;

[0012] 步骤5,金刚石生长面研抛:采用机械研磨抛光方法,对完成金刚石微柱阵列沉积的金刚石膜表面进行平整化,如图1E所示。

[0013] 进一步地,如步骤1所述,其特征在于,所述原始硅衬底减薄后,剩余厚度大于等于 $50\mu\text{m}$ 。

[0014] 进一步地,如步骤2所述,其特征在于所述硅衬底构建微孔,微孔尺寸及位置的设计以GaN功率器件发热源为参考,微孔刻蚀位置处于芯片热点正下方,且微孔尺寸大于芯片热源尺寸。

[0015] 进一步地,如步骤2所述,其特征在于所述硅衬底构建微孔,微孔结构内部需完全去除微孔内的硅衬底,直至GaN薄膜的N面区域。

[0016] 进一步地,如步骤2所述,其特征在于所述硅衬底构建微孔,方法可以是ICP、RIE等选择性刻蚀方法。

[0017] 进一步地,如步骤3所述,其特征在于微孔底部镀制一层介质层,介质层材质可以是 $\text{SiN}$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{SiC}$ 等。

[0018] 进一步地,如步骤4所述,其特征在于沉积的金刚石微柱阵列,金刚石微柱完全填充步骤2中所述硅衬底微孔,并延续到外侧。金刚石微柱高度大于等于 $50\mu\text{m}$ ,金刚石整体厚度大于等于 $100\mu\text{m}$ 。

[0019] 进一步地,如步骤4所述,其特征在于沉积的金刚石微柱阵列与步骤2中残留的硅衬底,同时构建金刚石微柱阵列网络结构散热衬底层。

[0020] 进一步地,如步骤4所述,其特征在于所述硅衬底上的微孔深宽比应小于等于0.5,以实现金刚石在微孔内部的稳定致密生长。

[0021] 至此,一种带金刚石微柱阵列的金刚石基GaN材料制备完成。

[0022] 本发明的优点及积极效果:

[0023] 制备了一种具有微柱阵列网络分布结构的金刚石基GaN半导体结构,用于解决现有技术在GaN半导体结构中衬底更换困难所带来的散热瓶颈。同时,硅的晶格常数介于氮化

镓和金刚石之间,金刚石微柱与原始衬底硅交替阵列排列的方式,比完全采用金刚石替代硅衬底所产生的晶格畸变更小。金刚石的高稳定性、高热导率对于先进设备也有着更为广阔的应用前景。

[0024] 1,采用金刚石与原始衬底硅交替排列的方式,保留了原始GaN-Si部分结构,晶格错排和畸变程度降低,大幅提高了散热效率。

[0025] 2,传统的GaN-on-Diamond集成生长工艺需要反复多次使用临时载体,步骤较为复杂,本发明中提出的方法不需要反复使用临时载体,可操作性强,对GaN的保护更全面。

[0026] 3,保留原始衬底的主体结构,显著抑制了制备的GaN-on-Diamond晶圆的形变,有利于后续的半导体工艺实现。

[0027] 4,采用微柱阵列结构,通过不连续的结构设计,缓释了由于热膨胀系数失配带来的热应力累积,减小了GaN性能衰减程度。

[0028] 5,采用金刚石和硅交错排列,获得圆柱形微米级别的金金刚石微结构,有效增大了导热面积。

[0029] 6,金刚石自身的导热性能十分优异,其热导率可以达到 $2000\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$ ,远远高于其他散热材料,满足高功耗电子设备热排散的要求。

[0030] 7,金刚石化学性质十分稳定,耐酸碱,耐腐蚀,因此金刚石微通道热沉使用的范围广泛,可以在各种极端条件下安全服役。且金刚石热膨胀系数小,性能安全可靠,受热不易变形,满足先进电子技术对封装散热材料的要求。

#### 附图说明:

[0031] 图1A GaN原始Si衬底减薄示意图,

[0032] 图1B硅衬底构建微孔示意图,

[0033] 图1C微孔底部镀至介质层示意图,

[0034] 图1D沉积金刚石微柱阵列示意图,

[0035] 图1E形成带金刚石微柱阵列结构示意图。

#### 具体实施方式

[0036] 实施例一

[0037] 1.使用晶圆的原始尺寸为直径 $\phi 10\text{mm}$ 、厚度 $680\mu\text{m}$ 的GaN-Si。通过临时载体对GaN-Si的Ga极性面进行研磨保护,其中临时载体为相同尺寸(直径为 $\phi 10\text{mm}$ )的硅晶圆,采用室温下稳定的有机粘结剂胶连GaN-Si和临时载体。胶体充分固化后,将整个晶圆固定至碳素钢研磨卡具中心位置,研磨卡具为外径 $50\text{mm}$ 、内径 $30\text{mm}$ 的空心圆柱体结构。研磨装置中选用多晶专用研磨抛光盘,采用金相氧化铝悬浮抛光溶液作为机械研磨液,其中氧化铝的平均粒度约为 $3\mu\text{m}$ 。机械研磨机的参数设置为研磨摆臂、研磨卡具保持自转,保证研磨的均一性;转速为 $50\text{r}/\text{min}$ ,最终将原始硅衬底减薄至 $50\mu\text{m}$ 。

[0038] 2.采用光刻技术照像复印的方法,将光刻掩模板上的图形精确地复制在涂有光致抗蚀剂的 $\text{SiO}_2$ 层上,在适当波长光的照射下,利用光致抗蚀剂的保护作用,对 $\text{SiO}_2$ 层进行选择性化学腐蚀,从而在 $\text{SiO}_2$ 层上得到与掩模板相对应的微孔结构,微孔尺寸 $100\mu\text{m}$ 。

[0039] 3.采用物理气相沉积设备(PVD)在对刻蚀微孔进行保护层的镀制,保护层为纳米

级的 $\text{SiN}_x$ 镀层,将磁控溅射设备的腔室真空度抽至 $4 \times 10^{-4} \text{Pa}$ ,选择硅靶材作为溅射靶材,采用氩气和氮气混合气体作为沉积气氛,氩气流量为 $10 \text{sccm}$ ,氮气流量为 $20 \text{sccm}$ , $\text{SiN}_x$ 薄膜的沉积温度为 $350^\circ\text{C}$ ,薄膜的表面元素比 $\text{Si:N}=3:4$ ,保护层沉积厚度约为 $50 \text{nm}$ 。

[0040] 4.对于微结构中金刚石的气相沉积,采用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)设备进行金刚石的生长。选用钼托作为生长金刚石衬底,将设备抽至真空状态,对设备的基础参数进行设置,初始功率设置为 $700 \text{W}$ ,通入氢气后进行等离子体起辉。通过不断增加腔室压力和功率,红外测温仪检测样品表面温度,直至样品表面温度达到 $700^\circ\text{C}$ 时,通入浓度为4%的甲烷气体进行 $30 \text{min}$ 的金刚石形核,随后降低甲烷浓度至3%进行金刚石的最终生长。该参数下金刚石的沉积速率为 $1 \mu\text{m/h}$ ,沉积至金刚石厚度为 $100 \mu\text{m}$ 。

#### [0041] 实施例二

[0042] 1.对于两英寸的大尺寸晶圆,使用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀对硅衬底进行选择性刻蚀,刻蚀气氛为 $\text{O}_2$ 和 $\text{SF}_6$ 混合气体, $\text{O}_2$ 浓度为 $10 \text{sccm}$ , $\text{SF}_6$ 浓度为 $60 \text{sccm}$ 。对刻蚀机参数进行初始设定,电源功率设定为 $800 \text{W}$ ,射频功率(RF)设定为 $30 \text{W}$ ,该参数下样品表面温度约为 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 。采用刻蚀后冷却的循环方式进行刻蚀,达到缓解大尺寸晶圆热应力的目的。第一阶段采用刻蚀 $5 \text{min}$ ,冷却 $3 \text{min}$ 的循环组合进行刻蚀,循环2次后,进入第二阶段,采用刻蚀 $3 \text{min}$ ,冷却 $1 \text{min}$ 的循环组合进行刻蚀,循环2次后将掩模板以外的硅衬底完全刻蚀,直至露出透明 $\text{GaN}$ 层,剩余原始 $\text{Si}$ 层厚度为 $50 \mu\text{m}$ 。

[0043] 2.采用光刻技术照像复印的方法,将光刻掩模板上的图形精确地复制在涂有光致抗蚀剂的 $\text{SiO}_2$ 层上,在适当波长光的照射下,利用光致抗蚀剂的保护作用,对 $\text{SiO}_2$ 层进行选择性化学腐蚀,从而在 $\text{SiO}_2$ 层上得到与掩模板相对应的微孔结构,微孔尺寸 $150 \mu\text{m}$ 。

[0044] 3.采用物理气相沉积设备(PVD)在微孔内镀制 $50 \text{nm}$ 厚的 $\text{SiN}_x$ 保护层,磁控溅射的靶材为硅靶材, $\text{SiN}_x$ 的沉积时间为 $10 \text{min}$ 左右。

[0045] 4.对于微结构中金刚石的气相沉积,采用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)设备进行金刚石的生长。选用钼托作为生长金刚石衬底,将设备腔室抽至真空状态,对设备的基础参数进行设置,初始功率设置为 $600 \text{W}$ ,通入氢气后进行等离子体起辉。通过不断增加腔室压力和功率,通过红外测温仪检测样品表面温度,直至样品表面温度至 $700^\circ\text{C}$ 时,通入浓度为5%的甲烷气体进行 $30 \text{min}$ 的金刚石形核,随后降低甲烷浓度至4%进行金刚石的最终生长。沉积至金刚石厚度为 $100 \mu\text{m}$ 。

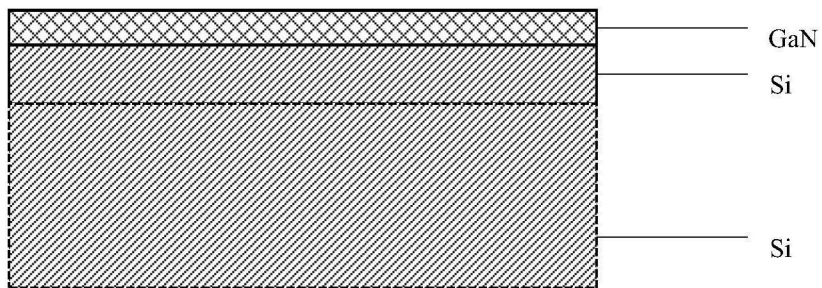


图1A

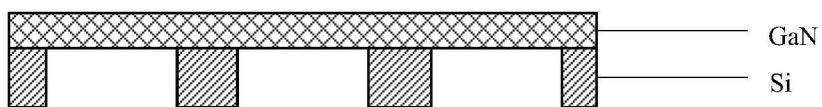


图1B

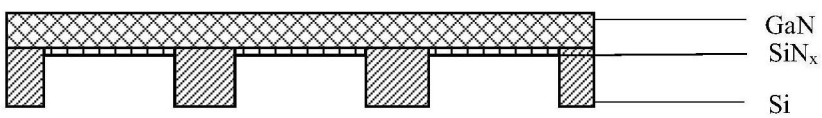


图1C

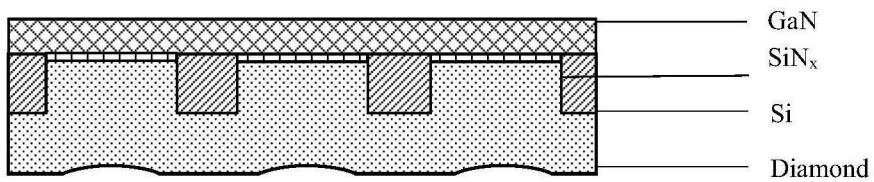


图1D

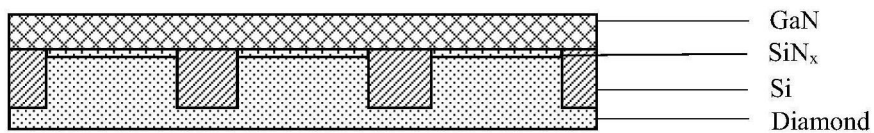


图1E