



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119349566 A

(43) 申请公布日 2025.01.24

(21) 申请号 202411323087.6

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2016.09.08

C01B 32/194 (2017.01)

(30) 优先权数据

62/215,223 2015.09.08 US

62/335,784 2016.05.13 US

62/361,717 2016.07.13 US

(62) 分案原申请数据

201680059078.8 2016.09.08

(71) 申请人 麻省理工学院

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 J·金

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

专利代理人 蔡胜有

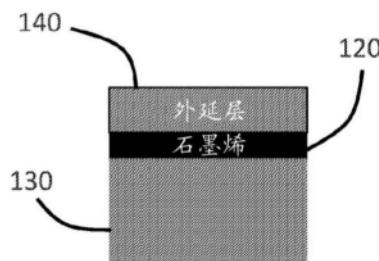
权利要求书1页 说明书16页 附图24页

(54) 发明名称

基于石墨烯的层转移的系统和方法

(57) 摘要

公开一种基于石墨烯的层转移(GBLT)技术。在此方法中，在石墨烯层上制造包括III-V半导体、Si、Ge、III-N半导体、SiC、SiGe或II-VI半导体的设备层，所述石墨烯层进而设置在衬底上。所述石墨烯层或所述衬底可以与所述设备层晶格匹配以减少所述设备层中的缺陷。然后可以通过例如附接到所述设备层的应力物从所述衬底移除所述制造的设备层。在GBLT中，所述石墨烯层充当用于生长设备层的可重新使用且通用的平台，并且还充当允许在石墨烯表面处快速、精确且可重复地释放的释放层。



1. 一种制造半导体设备的方法,所述方法包括:  
在第一衬底上形成连续石墨烯层,其中所述连续石墨烯层由单层石墨烯组成;  
将所述连续石墨烯层从所述第一衬底转移到具有势场的第二衬底;  
在所述连续石墨烯层上形成单晶膜,其中仅第二衬底的晶格与单晶膜匹配,使得仅所述第二衬底催化所述单晶膜的生长,且所述连续石墨烯层仅作为释放层起作用;以及  
分离所述单晶膜和所述第二衬底。
2. 如权利要求1所述的方法,其中所述第二衬底包含金属、氧化物、氮化物、III-V半导体、II-IV半导体、IV半导体或离子键合衬底。
3. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一衬底包括碳化硅,并且所述连续石墨烯层包括单晶石墨烯层。
4. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一衬底包括铜箔,并且所述连续石墨烯层包括多晶石墨烯层。
5. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一衬底包括硅衬底,并且形成所述连续石墨烯层包括:  
在所述硅衬底上形成锗层;以及  
在所述锗层上形成所述连续石墨烯层。
6. 如权利要求1所述的方法,其中所述连续石墨烯层包括单晶石墨烯。
7. 如权利要求1所述的方法,其中形成所述单晶膜包括在所述连续石墨烯层上沉积所述第二衬底的材料。
8. 如权利要求1所述的方法,其还包括:  
从所述连续石墨烯层移除所述单晶膜。
9. 如权利要求8所述的方法,其中从所述连续石墨烯层移除所述单晶膜包括剥落所述单晶膜。
10. 如权利要求8所述的方法,其中从所述连续石墨烯层移除所述单晶膜包括:  
在所述单晶膜上形成金属应力物;  
在所述金属应力物上设置柔性胶带;以及  
用所述柔性胶带将所述单晶膜和所述金属应力物拉离所述连续石墨烯层。

## 基于石墨烯的层转移的系统和方法

[0001] 本申请是申请日为2016年9月8日、申请号为201680059078.8、发明名称为“基于石墨烯的层转移的系统和方法”的发明专利申请的分案申请。

[0002] 相关申请的交叉引用

[0003] 本申请根据35U.S.C. §119(e)要求于2015年9月8日提交的题为“GRAPHENE-BASED LAYER TRANSFER PROCESS FOR ADVANCED COST-EFFICIENT ELECTRONICS/PHOTONICS”的美国申请号62/215,223的优先权权益，其全部内容特此以引用方式并入本文。

[0004] 本申请根据35U.S.C. §119(e)还要求于2016年5月13日提交的题为“DISLOCATION-FREE III-V INTEGRATION ON A SI WAFER”的美国申请号62/335,784的优先权权益，其全部内容特此以引用方式并入本文。

[0005] 本申请根据35U.S.C. §119(e)要求于2016年7月13日提交的题为“COST-EFFECTIVE LAYER-TRANSFER TECHNIQUE FOR ALL ELECTRONIC/PHOTONIC/MAGNETIC MATERIALS”的美国申请号62/361,717的优先权权益，其全部内容特此以引用方式并入本文。

[0006] 发明背景

[0007] 在先进的电子和光子技术中，设备通常由功能半导体制造，诸如III-N半导体、III-V半导体、II-VI半导体以及Ge等。这些功能半导体的晶格常数通常与硅衬底的晶格常数不匹配。如本领域中所理解，衬底与衬底上的外延层之间的晶格常数失配可将应变引入到外延层中，从而防止较厚层的外延生长没有缺陷。因此，通常将非硅衬底用作大多数功能半导体的外延生长的晶种。然而，晶格常数与功能材料的那些晶格常数相匹配的非Si衬底可能是昂贵的，因此限制了非Si电子/光子设备的发展。

[0008] 一种解决非硅衬底高成本的方法是“层转移”技术，其中功能设备层在晶格匹配的衬底上生长，然后将其移除并转移到其他衬底。然后，可以重新使用剩余的晶格匹配衬底来制造另一个设备层，从而降低成本。为了显著降低制造成本，可能需要层转移方法具有以下性质：1) 衬底可重用性；2) 层释放后的最少衬底翻新步骤；3) 快速释放速率；以及4) 释放厚度的精确控制。

[0009] 从晶格匹配的衬底移除并转移设备层的常规方法包括化学剥离（也称为外延剥离或ELO）、光学剥离（也称为激光剥离或LLO），以及机械剥落（也称为受控剥落）。不幸的是，这些方法中没有一种能同时具有这四个所需特性。

[0010] 化学剥离技术可用于从GaAs晶片上剥离由III-V半导体制成的设备层。AlAs的牺牲层通常以外延方式插入在设备层与衬底之间。化学剥离技术在湿式化学溶液中选择性地蚀刻牺牲层以释放设备层。

[0011] 尽管在过去三十年间不断发展，化学剥离仍具有若干缺点。例如，由于化学蚀刻剂缓慢渗透过牺牲层，所以释放速率缓慢（例如，通常几天释放单个8英寸晶片）。第二，蚀刻残余物在释放后倾向于变成表面污染。第三，由于在释放后执行化学机械平坦化（CMP）以将粗糙的衬底表面恢复成外延就绪的表面，所以化学剥离具有有限的可重用性。第四，在化学溶液中处理所释放的外延层可能具有挑战性。

[0012] 光学剥离技术通常使用高功率激光器来辐射晶格匹配衬底（例如，透明蓝宝石或

SiC衬底)的背面并选择性地加热设备-衬底界面,从而引起界面的分解和设备层(例如, III-N膜)的释放。此技术可以降低制造基于III-N的发光二极管(LED)的成本,并且通过将释放的III-N转移到具有高导热性的衬底来解决设备的热量积聚问题。

[0013] 然而,光学剥离自身也有局限性。第一,因为熔化的III-N/衬底界面会使衬底变得粗糙,所以通常在重新使用之前进行修复步骤,从而将可重用性降低到五倍以下。第二,由高功率热辐射引起的界面处的局部加压可诱发裂纹或位错。第三,激光扫描速度可能太慢而不能实现高通过量。

[0014] 相比光学剥离,受控剥落可以具有更高的通过量。在此技术中,高应力膜(也称为“应力物”)沉积在外延膜上,从而诱发外延层下方的断裂并导致活性材料与衬底的分离。当足够的拉伸应力施加到界面时, $K_{II}$ 剪切模式可引发裂纹,并且 $K_I$ 开放模式可允许裂纹的扩展平行于外延层与衬底之间的界面。通过控制应力物的内应力和厚度,可以提供足以达到临界 $K_I$ 的应变能,从而导致膜/衬底界面的断裂。因为剥落通过裂纹扩展而发生,所以剥落过程可引起膜的快速释放。

[0015] 然而,至少出于以下原因,受控剥落不够成熟,无法用于商业制造。第一,因为裂纹扩展通常通过并不总是在垂直于表面而对准的裂开平面上发生,所以表面可能需要抛光以重新使用。第二,通常使用厚应力物来提供足够的能量以分离强共价键,特别是在与如III-N半导体的高杨氏模量材料一起使用时。第三,应力物的内应力可能只能控制在狭窄的范围内,这限制所得到的剥落膜的可获得厚度。例如,因为典型Ni应力物中的最大内应力约为1GPa,所以引发GaAs膜剥落的1GPa拉伸应力下的临界Ni厚度约为 $1.5\mu\text{m}$ ,如果GaAs膜约为 $10\mu\text{m}$ 厚,那么可诱发GaAs膜自身的剥落。因此,当使用Ni应力物时,制作厚度小于 $10\mu\text{m}$ 的GaAs膜可能具有挑战性,但是通常大多数设备使用薄得多的膜。

## 发明内容

[0016] 本发明的实施方案包括用于纳米制造的装置、系统以及方法。在一个实例中,一种制造半导体设备的方法包括在第一衬底上形成石墨烯层,以及将所述石墨烯层从所述第一衬底转移到第二衬底。方法还包括在所述石墨烯层上形成单晶膜。

[0017] 在另一个实例中,一种半导体加工方法包括在碳化硅衬底上形成石墨烯单层,以及将所述石墨烯单层从所述碳化硅衬底转移到半导体衬底。所述方法还包括在所述石墨烯单层中形成多个孔,以及在所述石墨烯单层上形成半导体材料的第一单晶层。所述半导体衬底充当所述半导体材料的第一单晶层的晶种。所述方法还包括从所述石墨烯单层移除所述半导体材料的第一单晶层,以及在所述石墨烯单层上形成半导体材料的第二单晶层。所述半导体衬底充当所述半导体材料的第二单晶层的晶种。所述方法还包括从所述石墨烯单层移除所述半导体材料的第二单晶层。

[0018] 在又一实例中,一种半导体加工方法包括在第一衬底上形成石墨烯层,以及将所述石墨烯层从所述第一衬底转移到第二衬底。所述方法还包括在所述石墨烯层上沉积半导体层,以及在所述半导体层上沉积应力物层。所述应力物层在所述半导体层与所述石墨烯层之间引起裂纹扩展。所述方法还包括在所述应力物层上设置柔性胶带,以及用所述柔性胶带将所述半导体层和所述应力物层拉离所述石墨烯层。

[0019] 应理解,前述概念和在下面更具体讨论的另外概念的所有组合(假设这些概念不

相互矛盾)都被认为是本文所公开的本发明主题的一部分。具体地,出现在本公开的结尾处的要求保护的主题的所有组合被认为是本文所公开的本发明主题的一部分。还应理解,本文明确采用的、也可以出现在以引用方式并入的任何公开中的术语应赋予与本文所公开的特定概念最一致的含义。

[0020] 附图描述

[0021] 本领域技术人员将理解,附图主要用于说明的目的,并非意图限制本文所描述的发明主题的范围。附图不一定按比例绘制;在一些情况下,本文所公开的发明主题的各个方面在附图中可能夸大或放大示出,以促进对不同特征结构的理解。在附图中,相同的附图标记通常指代相同的特征结构(例如,功能上相似和/或结构上相似的元件)。

[0022] 图1A-1D展示使用基于石墨烯的层转移工艺来制造半导体设备的方法。

[0023] 图2是示出可用于使用图1A-1D中所展示的基于石墨烯的技术来制造设备的材料,以及这些材料的晶格常数和晶格失配的图。

[0024] 图3A-3F展示使用应力物层和胶带的基于石墨烯的层制造和转移的方法。

[0025] 图4A-4B示出石墨烯层厚度和底层衬底对石墨烯层上的设备层生长的影响。

[0026] 图5A-5E展示使用薄石墨烯层的基于石墨烯的层转移的方法。

[0027] 图6A示出在设置在SiO<sub>2</sub>衬底上的石墨烯上生长的GaN的高分辨率X射线衍射(HRXRD)扫描。

[0028] 图6B示出在设置在SiC衬底上的石墨烯上生长的GaN的HRXRD扫描。

[0029] 图7A-7C展示使用厚度不同的石墨烯层的基于石墨烯的制造技术的三种结构。

[0030] 图8A-8H展示使用对应于图7C中所示构造的多孔石墨烯的基于石墨烯的层制造和转移的方法。

[0031] 图9A和9B分别是在受损石墨烯上生长的Ge和GaAs外延层的扫描电子显微镜(SEM)图像。

[0032] 图10A和10B分别是图9A和9B中所示的Ge和GaAs外延层从衬底释放后的SEM图像。

[0033] 图11A-11H展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制造发光二极管的方法。

[0034] 图12A-12G展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制造GaAs太阳能电池的方法。

[0035] 图13A-13E展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制造多结太阳电池的方法。

[0036] 图14A-14C展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制造晶体管的方法。

[0037] 图15A-15F展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术的异质集成的方法。

[0038] 图16A-16F展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制备用于制造III-V设备的平台的方法。

## 具体实施方式

### [0039] 基于石墨烯的层生长

[0040] 如以上所描述,可能需要层转移工艺具有衬底可重用性、对释放后处理的最低需求、快速释放速率、释放界面的精确控制,以及用于大范围设备材料的通用性。常规的层转移工艺可能展现出所需特性中的一些。例如,对于机械剥离,层释放比化学剥离或光学剥离

快得多,而在化学剥离和光学剥离中可以更好地控制释放位置。然而,常规的层转移方法在层释放后表面变得粗糙,从而限制衬底的可重用性。事实上,以常规的层转移方法翻新衬底表面的工艺成本通常超过衬底成本,所以制造中的实际应用可能具有挑战性。此外,每种常规方法通常适用于有限数量的特定材料(例如,针对晶格接近于GaAs的晶格的III-V材料的化学剥离,以及针对可在透明衬底上生长的材料的光学剥离)。因此,这些方法的普遍使用也具有挑战性。

[0041] 为了解决常规的层转移方法的缺点,本文描述的系统和方法采用基于石墨烯的层转移(GBLT)方法来制造设备。在此方法中,在石墨烯层上制造功能设备,进而将所述石墨烯层设置在与功能设备层晶格匹配的衬底上。在一个实例中,将石墨烯层直接沉积在晶格匹配的衬底上。在另一个实例中,将石墨烯层从另一个衬底转移到晶格匹配的衬底。然后,可以通过例如附接到功能设备的应力物从晶格匹配的衬底移除制造的功能设备。

[0042] 在此GBLT方法中,石墨烯充当用于生长设备层的可重新使用且通用的平台,并且还提供允许在石墨烯表面处快速、精确且可重复地释放的释放层。与常规方法相比,GBLT具有若干优点。第一,因为石墨烯是一种晶体膜,所以它是用于生长外延覆盖层的合适衬底。第二,石墨烯与其他材料的相互作用较弱,从而可以充分缓解外延生长的晶格失配规则,潜在地允许具有低缺陷密度的大多数半导体膜的生长。第三,由于石墨烯的范德瓦尔斯(van der Waals)相互作用较弱,所以生长在石墨烯衬底上的外延层(例如,功能设备)可以容易且精确地从衬底释放,这允许外延层的快速机械释放而无需在释放所释放表面后重新调节。第四,石墨烯的机械稳健性可以最大化其可重用性以用于多个生长/释放周期。

[0043] GBLT针对一般材料系统的实现可能对科学界和工业界两者有重大影响,因为GBLT具有制造设备的潜力,而无需当前半导体加工中使用的昂贵的毫米级厚度的单晶晶片。另外,可以将整个功能设备从石墨烯层转移,以用于附加的灵活功能。

[0044] 图1A-1D展示使用石墨烯作为平台来制造设备层的方法100。如图1A中所示,在第一衬底110(诸如,Si衬底、SiC衬底或铜箔等)上制造石墨烯层120。然后,从第一衬底110移除制造的石墨烯层120,如图1B中所示。然后,将移除的石墨烯层120设置在第二衬底130(诸如,Ge衬底)上,如图1C所示。图1D示出随后在石墨烯层120上制造外延层140(例如,具有高电子和光学设备性能的单晶膜)。在本申请中外延层140也称为设备层或功能层。

[0045] 石墨烯层120可以通过各种方法制造在第一衬底110上。在一个实例中,石墨烯层120可以包括具有单晶取向的外延石墨烯,并且衬底110可以包括具有硅表面的(0001)4H-SiC晶片。石墨烯层120的制造可以包括多步退火步骤。可以在H<sub>2</sub>气体中执行第一退火步骤以进行表面蚀刻和邻晶化,并且可以在Ar中执行第二退火步骤以在高温(例如,约1,575°C)下进行石墨化。

[0046] 在另一个实例中,石墨烯层120可以通过化学气相沉积(CVD)工艺在第一衬底110上生长。衬底110可以包括镍衬底或铜衬底。可替代地,衬底110可以包括SiO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的绝缘衬底,以及实际上通过CVD生长的任何其他高温兼容平面材料。

[0047] 在又一实例中,第一衬底110可以是能够支承石墨烯层120的任何衬底,并且所述制造可以包括机械剥落工艺。在此实例中,第一衬底110可以充当石墨烯层120的临时支架。

[0048] 还可以使用各种方法将石墨烯层120从第一衬底110转移到第二衬底。在一个实例中,可以将载体膜附接到石墨烯层120。载体膜可以包括聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)的厚膜

或热释放胶带，并且所述附接可以通过旋涂工艺来实现。在将载体膜和石墨烯层120的组合设置在第二衬底130上之后，可以将载体膜溶解(例如，在丙酮中)以便在石墨烯层120上进一步制造外延层140。

[0049] 在另一个实例中，可以将包括弹性体材料(诸如聚二甲基硅氧烷(PDMS))的印模层附接到石墨烯层120，并且可以将第一衬底蚀刻掉，从而留下印模层和石墨烯层120的组合。在将印模层和石墨烯层120放置在第二衬底130上之后，可以通过机械分离来移除印模层，从而产生石墨烯层120的清洁表面以供进一步加工。

[0050] 在又一实例中，可以使用自释放转移方法将石墨烯层120转移到第二衬底130。在此方法中，首先在石墨烯层120上旋转铸造自释放层。然后，将弹性印模放置成与自释放层保形接触。可以将第一衬底110蚀刻掉，从而留下印模层、自释放层以及石墨烯层的组合。在将这个组合放置在第二衬底130上之后，可以机械地移除印模层，并且可以在温和条件下将自释放层溶解在合适的溶剂中。释放层可以包括聚苯乙烯(PS)、聚(异丁烯)(PIB)以及聚四氟乙烯(聚[4,5-二氟-2,2-双(三氟甲基)-1,3-间二氧杂环戊烯-共-四氟乙烯])。

[0051] 外延层140可以包括III-V半导体、Si、Ge、III-N半导体、SiC、SiGe以及II-VI半导体等等。在一个实例中，将第二衬底130的晶格与外延层140匹配，在这种情况下，如果石墨烯层120是多孔的或足够薄的(例如，如果石墨烯层120是一个层厚)，那么第二衬底130充当外延层140的生长的晶种。将石墨烯层120夹置在第二衬底130与外延层140之间可以促进外延层140的快速且无损坏的释放和转移。

[0052] 在另一个实例中，石墨烯层120可以足够厚(例如，几层厚)以充当晶种，以便生长外延层140，在这种情况下，外延层140可以与石墨烯层120晶格匹配。此实例还允许重复使用第二衬底130。在又一实例中，第二衬底130与石墨烯层120可以一起充当晶种以生长外延层140。

[0053] 使用石墨烯作为晶种来制造外延层140还可以增加外延层材料与石墨烯之间的晶格常数失配的容限。在不受限于任何特定理论或操作模式的情况下，二维(2D)材料(例如，石墨烯)或准2D层状晶体的表面通常不具有悬挂键，并且通过如弱范德瓦耳斯力与其上方的材料相互作用。由于相互作用较弱，外延层可以从一开始就以其自身的晶格常数生长，从而形成具有少量缺陷的界面。这种生长可以称为范德瓦尔斯外延(VDWE)。对于VDWE，晶格匹配条件可以得到彻底缓和，即便对于高度晶格失配的系统，也允许各种各样的不同的异质结构。

[0054] 在实践中，晶格失配可以是约0%至约70%(例如，约0%、约10%、约20%、约30%、约40%、约50%、约60%以及约70%，包括中间的任何值和子范围)。

[0055] 在一个实例中，外延层140包括2D材料系统。在另一个实例中，外延层140包括3D材料系统。制造2D和3D材料系统两者的灵活性允许本领域已知的宽范围的光学、光电和光子设备的制造。

[0056] 图2是示出可以沉积在石墨烯层120上以形成外延层140的材料的图。图2还示出这些材料的晶格常数以及这些晶格常数相对于石墨烯的失配。这些材料包括SiC、AlN、GaN、InN、GaP、AlP、硅、AlAs、Ge、GaAs以及InP。图2中列出的这些材料仅用于说明目的。在实践中，还可以使用具有与石墨烯相似的晶格失配的其他材料来形成外延层140。

[0057] 可以使用本领域已知的半导体制造技术来进行外延层140的制造。例如，可以使用

低压金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 在石墨烯层120上生长外延层140 (例如, GaN膜), 所述石墨烯层120进而设置在第二衬底130上 (例如, SiC衬底)。在此实例中, 可以对石墨烯层120和第二衬底130进行烘焙 (例如, 在 $>1,100^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{H}_2$ 下进行 $>15\text{min}$ ) 以清洁表面。然后, 可以在例如200mbar下执行包括GaN的外延层140的沉积。三甲基镓、氨以及氢可分别用作镓源、氮源以及载气。可以采用修改的两步生长来获得外延石墨烯120上的平坦GaN外延膜。第一步骤可以在 $1,100^{\circ}\text{C}$ 的生长温度下进行几分钟, 这可以促进平台边缘处的引导成核。第二生长步骤可以在 $1,250^{\circ}\text{C}$ 的高温下进行以促进横向生长。这种情况下的垂直GaN生长速率可以是每分钟约20nm。

[0058] 基于石墨烯的层转移

[0059] 图3A-3F展示基于石墨烯的层转移的方法300。图3A示出在施主晶片310上形成或设置石墨烯层320, 所述施主晶片310可以是单晶晶片。例如, 如现有技术已知, 石墨烯层320可以包括在施主晶片310上生长的外延石墨烯。可替代地, 可以将石墨烯层320从另一个晶片 (未示出) 剥落并转移到施主晶片310。在又一实例中, 以上参考图1A-1D描述的石墨烯转移技术中的任何一种可以在本文中用来制备在施主晶片320上设置的石墨烯层320。

[0060] 图3B示出在石墨烯层320上外延生长外延层330。外延层330可以包括电子层、光子层或任何其他功能设备层。制造外延层330的方法可以包括以上关于图1A-1D描述的任何方法和技术。

[0061] 图3C示出在外延层330上设置应力物340。例如, 应力物330可以包括高应力金属膜 (诸如, Ni膜)。在此实例中, Ni应力物可以在 $1 \times 10^{-5}$ 托的真空中沉积在蒸发器中。

[0062] 图3D示出在应力物340上设置胶带层350用于处理应力物340。通过向外延层330与石墨烯层320之间的界面施加高应变能, 使用胶带350和应力物340可以快速释放速率从石墨烯层320机械剥落外延层330。至少由于石墨烯与其他材料 (诸如, 外延层330) 之间的弱范德瓦尔斯键合, 所以释放速率可以是快速的。

[0063] 在图3E中, 将释放的外延层330与应力物340和胶带层350一起设置在主晶片360上。在图3F中, 移除胶带340和应力物340, 从而留下外延层330以供进一步加工, 诸如形成更复杂的设备或者在外延层330上沉积另外的材料。在一个实例中, 胶带层350和应力物340可以由基于 $\text{FeCl}_3$ 的溶液蚀刻掉。

[0064] 在方法300中, 在释放图3D中示出的外延层330之后, 可以重新使用剩余的施主晶片310和石墨烯层320以用于下一个外延层制造周期。可替代地, 还可以将石墨烯层320释放。在这种情况下, 可以在下一个外延层制造周期之前将新的石墨烯层设置在施主晶片310上。在任一情况下, 石墨烯层320都保护施主晶片310免受损坏, 从而允许多次使用并且降低成本。

[0065] 相比之下, 常规工艺通常在释放后包括化学机械平坦化 (CMP) 以修复晶片表面。CMP可能会消耗相对厚的材料, 并且重复的CMP可能会增加破坏晶片的机会。GBLT可以增加或最大化可重用性, 因为它可以产生原子级光滑的释放表面。在GBLT中, 层释放可以在外延层330与石墨烯层320之间的界面处精确地发生, 因为石墨烯的弱范德瓦尔斯力不允许与相邻材料牢固接合。这样一来, 石墨烯层320得以重新使用于多个生长/剥落周期, 而不再需要抛光步骤, 并且由于其机械稳健性而不会损坏石墨烯。此外, GBLT可以确保快速释放速率和针对不同材料的普遍应用。因为外延层330从较弱石墨烯表面机械地释放, 所以GBLT中的层

释放速率可能较高。然而,常规的层转移方法限于特定的材料,但是GBLT可以普遍地加以应用,因为VDWE可以克服极高的晶格失配,并且大多数半导体膜可以在石墨烯上外延生长。

[0066] 另外,如图3D中所示,通过在释放后具有高度应变的独立式外延层330,由外延层330制成的设备可以具有更高的电子或空穴迁移率。由外延层330制成的光电设备还可以具有增强的光学响应。

[0067] 为了从石墨烯层320机械地释放外延层330,可能需要应力物340的材料向外延层/石墨烯界面提供足够的应变能,以促进无损坏的剥落/转移。对机械释放过程的一个关注点可以是剥落期间外延层330的弯曲以及沉积期间应力物340的自剥落。如果在剥落期间曲率半径减小,那么外延层330中的应变能可增加。当应变能达到临界点时,可形成裂纹。另外,如果应力物中的应变能超过外延层/石墨烯界面能,那么外延层330可在应力物沉积期间分层。为了解决这个问题,可以通过反馈闭环控制来执行石墨烯上的外延层的转移。

[0068] 衬底场对外延层的影响

[0069] 在图1A-1D和图3A-3F所展示的方法中,在石墨烯层上制造设备层。由于石墨烯典型地处于一个原子厚度的数量级(例如,大约3埃),所以紧接在石墨烯下方的任何共价键合的衬底表面可以通过例如改变设备层的晶体取向来影响设备层的外延生长。因此,可能有益的是理解底层衬底对设备层的生长的影响,以便例如减少设备层上的缺陷密度以及控制设备层的特性(诸如,晶体取向)。

[0070] 图4A-4B示出基于石墨烯的制造系统的示意图,以说明底层衬底对设备层生长的影响。图4A示出包括衬底411和设置在衬底411上的石墨烯层421的系统401。在石墨烯层421上制造设备层431。衬底411具有势场441(例如,通过范德瓦尔斯力或其他原子力或分子力),如图4A中的箭头所指示。在这种情况下,石墨烯层421包括仅单个石墨烯单层(即,石墨烯层421是一个原子厚的),并且势场441到达石墨烯层421之外并且可以与设备层431相互作用。因此,取决于衬底411的材料特性(诸如,晶体取向)的势场441可以影响设备层431的生长。同时,石墨烯层421也具有其自己的势场(图4A中未示出),所述势场可以类似地影响设备层431的生长。最终结果可以是设备层431包括两个取向(诸如(100)和(111)取向)不同的膜431a和431b。可替代地,衬底力可以足够强以克服石墨烯场,在这种情况下,可以生长类似衬底的单晶膜。

[0071] 图4B示出包括衬底412和设置在衬底412上的石墨烯层422的系统402。在石墨烯层422上制造设备层432。衬底412具有势场442,如图4B中的箭头所指示。与图4A中的石墨烯层421相比,图4B中的石墨烯层422包括单层石墨烯的多个堆叠(即,石墨烯层422是比一个原子厚的)。因此,势场442可以仅与石墨烯层422相互作用并且可以不到达设备层432。换句话说,设备层432的VDWE出现在衬底412的势场442之外。在这种情况下,石墨烯层422的势场影响设备层432的生长。

[0072] 图4A-4B展示衬底(例如,411和412)对设备层(例如,431和432)的生长的影响取决于它们之间的距离。话句话说,夹置在衬底与设备层之间的石墨烯层(例如,421和422)的厚度决定相互作用强度。在超出临界距离之后,底层衬底可能对设备层的外延生长没有任何影响。通过使用高分辨X射线衍射(HRXRD)来监测随石墨烯厚度的变化外延层的晶体取向,可验证出这个临界距离,因为外延层在超出临界距离时可能与石墨烯晶格类似。

[0073] 图5A-5E展示使用薄石墨烯层的基于石墨烯的层转移的方法500。在图5A中,提供

施主晶片510a以生长石墨烯层520(如图5B中所示)。图5B示出随后将石墨烯层520转移到第二晶片510b,所述石墨烯层520可以包括III-N半导体、II-IV半导体、III-V半导体以及IV半导体。

[0074] 在图5C中,在石墨烯层520上方外延生长膜530。由于在这种情况下石墨烯层520足够薄,所以膜530的生长由石墨烯层520下面的第二晶片510b催化(seed)。在图5D中,在膜530上沉积应力物540以促进后续的层转移。应力物540可以包括高应力金属材料(诸如,镍)。在图5E中,在应力物540上设置胶带层550以处理用于从石墨烯层520和第二晶片510b释放膜530的应力物540。在方法500中,石墨烯层520足够薄并且石墨烯晶种效应可以消失,而衬底晶种效应较强。以此方式,人们可以通过方法500制造任何可释放的膜。

[0075] 图6A-6B示出使用不同的底层衬底在石墨烯上生长的外延层的结晶取向的变化。图6A示出石墨烯/SiO<sub>2</sub>(石墨烯在SiO<sub>2</sub>衬底上)上的GaN的HRXRD中的ω-2θ扫描。图6B示出石墨烯/SiC(石墨烯在SiC衬底上)上的GaN的ω-2θ扫描。

[0076] 为了消除外延石墨烯与SiC衬底之间的外延关系,可以将如图6A中使用的外延石墨烯从SiC剥落,然后转移到涂覆有SiO<sub>2</sub>的非晶质Si衬底。然后,可以在衬底上生长GaN。HRXRD ω-2θ扫描揭示,生长在SiO<sub>2</sub>顶部上的外延石墨烯上的GaN膜是(0002)织构多晶的,而生长在SiC顶部上的外延石墨烯上的GaN膜具有单一(0002)取向(参见图6A和6B)。这意味着石墨烯层正下方的衬底在确定外延取向中起作用。因此,可以采用衬底的材料(或晶体取向)来控制设备层的外延取向。

[0077] 基于石墨烯的层制造和转移中晶种位置的控制

[0078] 在基于石墨烯的层制造和转移的实际应用中,可能有益的是外延注册(registry)可调谐到石墨烯或衬底以便在石墨烯上获得高质量单晶膜。通过对晶种位置的这种控制,可以实现石墨烯上的直接外延或从衬底催化的远程外延。在石墨烯上的直接外延中,石墨烯起着晶种以及释放层的作用。在从衬底催化的远程外延中,石墨烯仅变成释放层,而衬底用作晶种。

[0079] 图7A-7C展示使用厚度不同的石墨烯层的三种不同类型的基于石墨烯的制造系统的示意图。在应用时,用户可以基于设备层与底层衬底之间的所需相互作用强度或者可替代地取决于设备层与石墨烯之间的所需相互作用强度来选择使用这些系统中的一个。这三个选项可以提供很大的灵活性以适应不同的制造任务。

[0080] 图7A示出包括衬底711和生长在衬底711上的石墨烯层721的系统701(也称为I型系统)。然后,在石墨烯层721上外延生长外延层731。在I型系统701中,石墨烯层721和衬底711两者与外延层731相互作用,如图7A中的箭头所指示。

[0081] 在一个实例中,外延石墨烯721(例如,单层石墨烯)可以在SiC衬底上生长以用于在I型系统中使用。在此实例中,因为石墨烯和SiC的结晶取向是一致的,所以它们都可以对<0001>纤锌矿结构提供六角晶种。由于III-N半导体与石墨烯之间的晶格失配很小,所以这种衬底可用于生长单晶纤锌矿III-N(或SiC)膜。这种外延石墨烯/SiC衬底也可用于生长(111)立方III-V、Si以及Ge膜,因为石墨烯和SiC两者都变成(111)取向的晶种。

[0082] 在另一个实例中,衬底711包括锗(Ge)以外延生长石墨烯层721。Ge与其他立方材料之间的晶格失配通常小于SiC与立方材料之间的晶格失配。在此实例中,石墨烯层721可以通过MOCVD技术在Ge衬底711上生长。在又一实例中,石墨烯可以在其他半导体晶片上(诸

如,GaAs、InP和GaN)直接生长。

[0083] 图7B示出包括衬底712和生长在衬底712上的石墨烯层722的系统702(也称为II型系统)。然后,在石墨烯层722上外延生长外延层732。在II型系统702中,石墨烯层722的厚度基本上等于或大于衬底712与外延层732之间的相互作用的临界距离。因此,外延层732仅与提供纯VDWE的外延石墨烯722相互作用。此II型系统可以适合于生长III-N半导体膜或SiC单晶膜,因为其与石墨烯的晶格失配基本上不是很高。铜箔可用来制造大尺寸(例如,大于8英寸、大于12英寸或更大)的多晶石墨烯。

[0084] 图7C示出包括衬底713和生长在衬底713上的石墨烯层723的系统703(也称为III型系统)。然后,在石墨烯层723上外延生长外延层733。在III型系统703中,石墨烯层723仅用作释放层并且外延生长仅从衬底713催化。可以使用具有与外延层733相同或类似的晶格的衬底材料。石墨烯层723不参与确定外延层733的晶体取向。因此,石墨烯层723可以包括单晶石墨烯或多晶石墨烯。

[0085] III型系统将外延层733的注册分配给衬底。这种构造的一个优点在于,高质量的外延层可以在晶格匹配的衬底上生长,就像在同质外延中一样,而外延层可以从石墨烯表面释放。为了实现这一优点,可能需要石墨烯层723在生长期间对外延层733基本上透明。这可以通过由离子(例如,干法蚀刻)对石墨烯进行非晶化或损坏来实现。石墨烯层723的损坏可以允许外延层733和衬底713穿过石墨烯层723的直接相互作用,使得石墨烯层723并不引导外延层733的晶体取向。

[0086] 在一个实例中,衬底具有诸如III-V衬底、III-N衬底、II-V衬底和/或离子键合衬底的极性(例如,氧化物、钙钛矿),原始石墨烯可以转移到晶片上,并且外延层可以具有与晶片相同的结晶度,并且生长的膜可以作好被剥落的准备。在另一个实例中,衬底可以不具有极性(例如,IV族),损坏石墨烯可有助于促进衬底/外延层相互作用。

[0087] 图8A-8H展示使用具有周期性孔的石墨烯(其在下文中被称为多孔石墨烯)的基于石墨烯的层制造和转移的方法800。方法800可以用III型系统来实现,其中石墨烯充当释放层并且衬底催化一个或多个功能层的外延生长。

[0088] 在图8A中,在衬底810上设置石墨烯层820。例如,石墨烯层820可以通过化学气相沉积在衬底810上生长。可替代地,可以将石墨烯层820转移到衬底810。然后,在石墨烯层820上设置多孔膜830(例如,氧化物、氮化物或光致抗蚀剂膜),如图8B中所示。多孔膜830具有高密度的针孔(例如,每平方微米约一个孔)。可替代地,多孔膜830可以包括具有孔的任何膜,以允许图8C-8H中示出的后续加工。

[0089] 在图8C中,使用Ar等离子体或O<sub>2</sub>等离子体来进行干法蚀刻,以打开多孔膜830中的针孔。所述蚀刻在多孔膜830中产生多个孔835,从而允许蚀刻等离子体中的离子穿过多孔膜830并到达石墨烯层820。然后,蚀刻等离子体蚀刻多孔膜830中的针孔835正下方的部分石墨烯层820。蚀刻等离子体中的离子可以通过在石墨烯层820中产生多个孔825来损坏石墨烯层820,所述石墨烯层820现在变成多孔石墨烯层820。在一个实例中,可以用相同的蚀刻等离子体来实现多孔膜830的蚀刻和石墨烯层820的蚀刻。在另一个实例中,可以用不同的蚀刻等离子体来实现多孔膜830的蚀刻和石墨烯层820的蚀刻。

[0090] 在图8E中,移除多孔膜830,从而使得现在多孔的石墨烯层820暴露以供进一步加工。在一个实例中,多孔膜830包括光刻胶材料并且可以通过丙酮移除。在另一个实例中,多

孔膜830包括氧化物或氮化物，并且可以通过氟化氢(HF)移除。图8E还示出在多孔石墨烯层820上生长外延层840。生长从产生孔825的区域开始。孔825允许衬底810与外延层840的直接相互作用，从而允许衬底810引导外延层840的晶体取向。然后，外延层840的生长延伸以覆盖整个石墨烯层820，从而形成平面外延层840。

[0091] 在图8G中，从石墨烯层820和衬底810释放形成的外延层840。将释放的外延层840转移到目标衬底850，如图8H中所示，以供进一步加工(诸如形成功能设备)。然后，在释放图8G中示出的外延层840之后，重新使用石墨烯层820和衬底810来制造另一个外延层，并且所述周期可以重复多次。

[0092] 图9A和9B分别是在受损石墨烯上生长的Ge和GaAs膜的扫描电子显微镜(SEM)图像。尽管在表面上由于石墨烯上的有限成核以及生长前沿的不完全撞击而出现凹坑，但观察到从衬底完全催化的平面(100)晶体。

[0093] 图10A和10B分别是图9A和9B中示出的Ge和GaAs膜在使用Ni应力物剥落之后的SEM图像。光滑的剥落表面意味着所述层从石墨烯的精确释放，并且这通过在湿式转移期间观察石墨烯状褶皱的痕迹而证实。

[0094] 如图8A-8H中所展示并且在图9A-9B和图10A-10B中进行实验研究的这种多孔石墨烯方法可以应用于若干其他材料系统。在一个实例中，可以在设置在InP晶片上的受损石墨烯上制造InP膜。在另一个实例中，可以在设置在Si晶片上的受损石墨烯上生长Si膜。在又一实例中，可以在设置在GaN晶片上的受损石墨烯上生长GaN膜。外延层的外延注册可以调谐到衬底，以确保通过石墨烯成功外延生长到衬底上。

#### [0095] 功能型柔性设备的制造和异质集成

[0096] 基于石墨烯的层制造和转移技术可用于基于生长在石墨烯上的外延层来制造各种功能设备。在一个实例中，III-N高电子迁移率晶体管(HEMT)可以由III-N外延层制造。然后，可以将晶体管转移到多晶金刚石衬底上以便散热。GaN功率设备也可以由这些膜构成。在另一个实例中，柔性GaAs太阳能电池可以由III-V外延层制造。与Si集成电路集成的光电子设备也可以由III-V外延层构成。在又一实例中，基于Ge的LED和光电检测器可以通过在石墨烯上生长IV外延层、剥落所述IV外延层、将独立式Ge拉伸到拉伸应变的Ge，并且将所述IV外延层转移到Si集成电路来制造。在又一实例中，Ge可以在12英寸Si晶片上生长，然后用作晶种以生长单晶石墨烯。然后，III-V光电子材料可以在Ge/Si晶片上的石墨烯上生长而没有任何位错。

[0097] 图11A-11H展示使用上述基于石墨烯的层转移技术制造发光二极管(LED)的方法1100。在图11A中，在衬底1110(例如，6英寸SiC衬底)上生长石墨烯层1120。然后，将石墨烯层1120从衬底1110释放，如图11B中所示，并且转移到目标衬底1130，如图11C中所示。目标衬底1130可以比例如图11A中使用的SiC晶片便宜。

[0098] 在图11D中，在石墨烯层1120上制造LED堆叠1140(例如，可见LED堆叠)。在此实例中，LED堆叠1140包括夹置在p-GaN与n-GaN层之间的III-氮化物多量子阱(InGaN阱和GaN势垒)的三个周期。如本领域技术人员容易理解的，还可以在石墨烯层1120上生长其他类型的LED堆叠。

[0099] 然后，可以以至少两种方式加工制造的LED堆叠1140。在一种方式中，如图11E所展示，可以将电极1150沉积在LED堆叠1140上以形成电接触点。例如，可以将薄的Ni/Au(5nm/

5nm) 沉积在LED堆叠1140上,然后在500°C下退火10min。这样就产生包括衬底1130的LED。

[0100] 可替代地,如图11F中所展示,可以从衬底1130移除LED堆叠1140。为了从衬底1130移除LED堆叠1140,将应力物层1160设置在LED堆叠1140上,以从目标衬底1130和石墨烯1120释放LED堆叠1140。然后,将应力物层1160和LED堆叠1140的组合翻转并放置在第二目标衬底1135上,如图11G中所示。将应力物层1160与第二目标衬底1135接触并且将LED堆叠1140暴露以供进一步加工。例如,图11G示出从LED叠层1140蚀刻LED台面1145。在图11F中,将另外的电触点1170与LED台面1145和应力物层1160集成。

[0101] 在一个实例中,石墨烯层1120可以催化LED堆叠1140的生长,并且目标衬底1130可以对LED堆叠1140的生长没有任何影响。在另一个实例中,可以使用III型催化(例如,图7C中所展示)。在这种情况下,石墨烯层1120可以很薄,并且目标衬底1130可以催化LED堆叠1140的生长。目标衬底1130可以包括GaN衬底。

[0102] 图12A-12G展示使用基于石墨烯的层转移技术来制造GaAs太阳能电池的方法1200。在图12A中,在衬底1210(例如,6英寸SiC晶片)上制造石墨烯层1220(例如,单晶石墨烯层)。然后,如图12B所见,将石墨烯层1220转移到目标衬底1230。图12C示出通过例如本领域已知的外延生长技术在石墨烯层1220上制造GaAs太阳能电池1240。图12D示出然后将应力物层1250沉积在太阳能电池1240上以促进后续的设备转移。将胶带层1260设置在应力物1250上以有助于处理设备转移,如图12E中所示。

[0103] 在从目标衬底1230释放之后,太阳能电池1240变成独立式的,并且可以以两种方式加工。在一种方式中,如图12F中所展示,太阳能电池1240可以放置在金属1240上以供后续的模块制造。太阳能电池1240可以通过直接结合或本领域已知的任何其他技术放置在金属1240上。可替代地,如图12G中所展示,独立式太阳能电池1240与应力物层1250和胶带层1260一起以其自己的方式形成轻量且柔性的太阳能电池组件。这种柔性太阳能电池组件可以轻松地集成到其他系统中,包括电力电子设备。

[0104] 在一个实例中,石墨烯层1220可以催化太阳能电池1240的生长,并且目标衬底1230可以对太阳能电池1240的生长没有任何影响。在另一个实例中,可以使用III型催化(例如,图7C中所展示)。在这种情况下,石墨烯层1220可以很薄,并且目标衬底1230可以催化太阳能电池1240的生长。目标衬底1230可以包括GaN衬底。

[0105] 图13A-13E示出使用基于石墨烯的层转移技术制造多结太阳能电池的方法1300。方法1300通过在具有透明导电氧化物(TCO)表面的玻璃衬底1310上设置石墨烯层1320而开始,如图13A中所示。可以通过本申请中描述的任何方法或本领域已知的任何其他方法将石墨烯层1320转移到玻璃衬底1310。

[0106] 图13B示出在石墨烯层1320上沉积三个材料层,包括InGaP层1330、InGaP层1330上的GaAs层1340以及GaAs层1340上的第二石墨烯层1350。图13C示出在第二石墨烯层1350上沉积InGaAs层1360。第二石墨烯层1350可以在制造InGaAs层1360期间有助于晶格匹配。然后,在InGaAs层1360上放置金属触点1370以供电传导,如图13D中所示。然后,在图13E中将InGaP层1330、GaAs层1340、第二石墨烯层1350以及InGaAs层1360的堆叠蚀刻成两个太阳能电池台面1380,所述太阳能台面1380中的每一个位于相应的金属触点1370下方。

[0107] 图14A-14C展示制造晶体管的方法1400。在图14A中,在衬底1410(诸如,SiC晶片)上设置石墨烯层1420。在石墨烯层1420上沉积InGaAs层1430。如图14B中所示,然后将

InGaAs层1430转移到硅晶片1440，所述硅晶片1440的表面上设置有氧化物层1450。然后，在InGaAs层1430上沉积Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层1470作为顶部栅极电介质。如图14C中所示，在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层1470上制造栅极1480以形成晶体管。

[0108] 在一个实例中，石墨烯层1420可以催化InGaAs层1430的生长，并且硅晶片1440可以对InGaAs层1430的生长没有任何影响。在另一个实例中，可以使用III型接种(例如，图7C中所展示)。在这种情况下，石墨烯层1420可以很薄，并且可以用InP衬底替换硅晶片1440，以便接种InGaAs层1430的生长。

[0109] 图15A-15F展示使用石墨烯基层转移技术形成异质结构的方法1500。在图15A中，在衬底1510(诸如，SiC晶片)上设置石墨烯层1520(例如，单层石墨烯)。然后，在石墨烯层1520上外延生长h-BN层1530(即，六方晶形氮化硼)。图15B示出在h-BN层1530上涂覆应力物层1540(例如，镍膜)，并且在应力物层1540上设置胶带层1550。如之前所描述，胶带层1550和应力物层1540可以将h-BN层1530转移到包括顶部上具有氧化物层1565(例如，氧化硅)的硅晶片1560的第二衬底，如图15C中所展示。图15C还示出将应力物层1540和胶带层1550蚀刻掉，从而留下h-BN层1530以供进一步加工。

[0110] 在图15D中，在h-BN层1530上沉积MoS<sub>2</sub>层1570，并且在MoS<sub>2</sub>层1570上沉积第二h-BN层1580以形成h-BN/MoS<sub>2</sub>异质结构。图15F示出在第二h-BN层1580上沉积HfO<sub>3</sub>层1590作为顶部栅极电介质，并且在HfO<sub>3</sub>层1590上沉积顶部栅极1595以供电传导。

[0111] 图16A-16F展示使用基于石墨烯的层制造和转移技术来制备用于制造III-V设备的平台的方法1600。图16A示出12英寸硅晶片1610。然后，通过例如外延生长将松弛的Ge膜1620设置在晶片1610上，如图12B中所示。然后，Ge膜1620充当晶种以外延生长石墨烯层1630，如图16C所见。石墨烯层1630可以包括单晶石墨烯。

[0112] 在图16D中，通过例如本领域已知的光刻技术来图案化石墨烯层1630。图案化导致石墨烯层1630中的间隙1635。换句话说，石墨烯层1630可以图案化成分离且较小的石墨烯层碎片。在图16E中，在石墨烯层1620上制造设备层1640。设备层1640可以包括例如，III-V材料或诸如金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、激光器等结构或本领域已知的任何其他结构。然后，设备层1640充当平台以形成另外的设备1650，如图16I所示。

### [0113] 结论

[0114] 虽然本文已经描述和展示各种本发明的实施方案，但是本领域的普通技术人员将容易设想出用于执行本文描述的功能以及/或者获得本文描述的结果和/或一个或多个优点的各种其他方法和/或结构，并且这类变型和/或修改中的每一个均被认为在本文描述的本发明实施方案的范围内。更一般地，本领域技术人员将容易理解，本文描述的所有参数、尺寸、材料和结构都是示例性的，并且实际参数、尺寸、材料和/或结构将取决于使用本发明教义的具体应用。本领域的技术人员将认识到，或者仅仅使用常规实验就能够确定本文描述的具体的本发明实施方案的许多等同物。因此，应理解，前述实施方案仅以举例的方式呈现，并且在所附权利要求书及其等同物的范围内，可以以除了具体描述和要求保护的方式之外的方式来实践本发明实施方案。本公开的本发明实施方案针对本文描述的每个单独的特征、系统、物品、材料、套件和/或方法。此外，如果这类特征、系统、物品、材料、套件和/或方法不相互矛盾，那么两个或更多个此类特征、系统、物品、材料、套件和/或方法的任何组合都包括在本公开的本发明范围内。

[0115] 以上描述的实施方案可以以多种方式中的任何一种来实现。例如,设计和制造本文公开的技术的实施方案可以使用硬件、软件或其组合来实现。当以软件实现时,软件代码可以在无论是在单个计算机中提供还是在多个计算机中分布的任何合适的处理器或处理器集合上执行。

[0116] 另外,应理解,计算机可以以多种形式中的任何一种来实施,诸如机架式计算机、台式计算机、膝上型计算机或平板电脑。此外,计算机可以嵌入在通常不被认为是计算机但具有合适的处理能力的设备中,包括个人数字助理 (PDA)、智能电话或任何其他合适的便携式或固定电子设备。

[0117] 另外,计算机可以具有一个或多个输入和输出设备。除此之外,这些设备可用来呈现用户界面。可用来提供用户界面的输出设备的实例包括用于输出的可视呈现的打印机或显示屏,以及用于输出的可听呈现的扬声器或其他声音生成设备。可用于用户界面的输入设备的实例包括键盘和定点设备,诸如鼠标、触摸板和数字化输入板等。作为另一个实例,计算机可以通过语音识别或以其他可听格式接收输入信息。

[0118] 这类计算机可以通过一个或多个网络以任何合适的形式互连,包括局域网或广域网,诸如企业网络和智能网络 (IN) 或因特网等。这类网络可以基于任何合适的技术并且可以根据任何合适的协议来操作并且可以包括无线网络、有线网络或光纤网络。

[0119] 本文所概述的各种方法或过程可被编码为可在采用各种操作系统或平台中的任何一个或多个处理器上执行的软件。此外,可以使用多种合适的编程语言和/或编程或脚本工具中的任何一种编写这种软件,并且还可以编译为在框架或虚拟机上执行的可执行机器语言代码或中间代码。

[0120] 在这方面,各种本发明构思可以实施为用一个或多个程序编码的计算机可读存储介质(或多个计算机可读存储介质)(例如,计算机存储器、一个或多个软盘、紧致盘、光盘、磁带、闪存、现场可编程门阵列或其他半导体设备中的电路配置,或者其他非暂态介质或有形计算机存储介质),当所述程序在一个或多个计算机或其他处理器上执行时,执行实现以上所讨论的本发明的各种实施方案的方法。这一个或多个计算机可读介质可以是可移动的,使得其上存储的一个或多个程序可以被加载到一个或多个不同的计算机或其他处理器上,以实现如以上所讨论的本发明的各个方面。

[0121] 本文以一般意义使用术语“程序”或“软件”来指代可用来编程计算机或其他处理器以实现如以上所讨论的实施方案的各个方面 的任何类型的计算机代码或计算机可执行指令集。此外,应理解,当被执行时完成本发明的方法的一个或多个计算机程序不需要驻留在单个计算机或处理器上,而是可以以模块化方式分布在多个不同的计算机或处理器之间以实现本发明的各个方面。

[0122] 计算机可执行指令可以有许多形式,诸如由一个或多个计算机或其他设备执行的程序模块。一般来说,程序模块包括执行特定任务或实现特定抽象数据类型的例行程式、程序、对象、组件、数据结构等。通常,程序模块的功能可以根据需要在各种实施方案中进行组合或分布。

[0123] 另外,数据结构可以以任何合适的形式存储在计算机可读介质中。为了简化说明,可以将数据结构示出为具有通过数据结构中的位置而相关的字段。这类关系同样可以通过对具有传达字段之间的关系的、在计算机可读介质中的位置的字段分配存储来实现。然而,

可以使用任何合适的机制来建立数据结构的字段中的信息之间的关系,包括通过使用指针、标签或建立数据元素之间关系的其他机制。

[0124] 另外,各种本发明构思可以实施为已经提供实例的一个或多个方法。作为所述方法的一部分执行的动作可以以任何合适的方式来排序。因此,可以构建以不同于所展示的顺序执行动作的实施方案,所述实施方案可以包括同时执行一些动作,即使这些动作在说明性实施方案中被示出为顺序动作。

[0125] 如本文所定义和使用的所有定义应理解为凌驾于字典的定义、以引用方式并入的文献中的定义和/或所定义术语的普通含义。

[0126] 如本文说明书和权利要求书中使用的不定冠词“一”和“一个”应理解为意指“至少一个”,除非明确地表明相反。

[0127] 如本文说明书和权利要求书中使用的“和/或”应理解为意指如此联合的元素,即在一些情况下联合存在并且在其他情况下分开存在的元素中的“两者之一或两者”。用“和/或”列出的多个元素应以相同的方式解释,即如此联合的元素中的“一个或多个”。除了由“和/或”子句明确标识的元素之外,还可以任选地存在其他元素,不论与明确标识的那些元素相关还是不相关。因此,作为非限制性实例,当涉及“A和/或B”与开放式语言(诸如“包括”)结合使用时,在一个实施方案中可以仅指代A(任选地包括除了B之外的元素);在另一个实施方案中可仅指代B(任选地包括除了BA之外的元素);在又一实施方案中可指代A和B两者(任选地包括其他元素);等等。

[0128] 如本文说明书和权利要求书中使用的“或”应理解为具有与如以上所定义的“和/或”相同的含义。例如,当分离列表中的项目时,“或”或“和/或”应解释为包括性的,即包括多个元素或元素列表中的至少一个元素,但是也包括多于一个元素,以及任选地包括另外未列出的项目。只有诸如“仅仅之一”或“正好之一”的术语清楚地表明相反,或者当在权利要求书中使用“由...组成”时,将指代包括多个元素或元素列表中的正好一个元素。总之,只有当前面有排他性术语时,诸如“两者之一”、“之一”、“仅仅之一”或“正好之一”时,如本文所使用的术语“或”才应解释为表明排他性的替代方案(即,一个或另一个,而不是两者)。“基本上由...组成”在权利要求书中使用时应具有其在专利法领域中所使用的通常含义。

[0129] 如本文说明书和权利要求书中使用的涉及一个或多个元素的列表的短语“至少一个”应理解为意指选自元素列表中的任意一个或多个元素的至少一个元素,但不一定包括在元素列表内明确列出的每一个元素中的至少一个,并且不排除元素列表中的元素的任意组合。这个定义还允许除了短语“至少一个”所指的元素列表内明确标识的元素之外,还可以任选地存在其他元素,不论与明确标识的那些元素相关还是不相关。因此,作为非限制性实例,“A和B中的至少一个”(或者等同地,“A或B中的至少一个”,或者等同地,“A和/或B中的至少一个”)可在在一个实施方案中指代至少一个A,任选地包括多于一个A,但不存在B(并且任选地包括除了B之外的元素);在另一个实施方案中,指代至少一个B,任选地包括多于一个B,但不存在A(并且任选地包括除了A之外的元素);在又一实施方案中,指代至少一个A,任选地包括多于一个A,以及至少一个B,任选地包括多于一个B(并且任选地包括其他元素);等等。

[0130] 在权利要求书以及以上说明书中,诸如“包含”、“包括”、“携带”、“具有”、“含有”、“涉及”、“保留”、“由...组成”等所有过渡性短语应理解为是开放性的,即,意指包括但不限

于。如美国专利局专利审查程序手册章节2111.03中所阐述，只有过渡短语“由……组成”和“基本上由…组成”应分别是封闭式或半封闭式过渡短语。

- [0131] 更具体地，本申请提供下列各项：
- [0132] 1. 一种制造半导体设备的方法，所述方法包括：
  - [0133] 在第一衬底上形成石墨烯层；
  - [0134] 将所述石墨烯层从所述第一衬底转移到第二衬底；以及
  - [0135] 在所述石墨烯层上形成单晶膜。
- [0136] 2. 如项1所述的方法，其中所述第一衬底包括碳化硅，并且所述石墨烯层包括单晶石墨烯层。
- [0137] 3. 如项1所述的方法，其中所述第一衬底包括铜箔，并且所述石墨烯层包括多晶石墨烯层。
- [0138] 4. 如项1所述的方法，其中所述第一衬底包括硅衬底，并且形成所述石墨烯层包括：
  - [0139] 在所述硅衬底上形成锗层；以及
  - [0140] 在所述锗层上形成所述石墨烯层。
- [0141] 5. 如项1所述的方法，其中所述石墨烯层由单层石墨烯组成，并且在所述石墨烯层上形成所述单晶膜包括使用所述第二衬底作为所述单晶膜的晶种以及使用所述石墨烯层作为释放层。
- [0142] 6. 如项5所述的方法，其中所述石墨烯层包括多晶石墨烯，并且所述第一衬底包括铜箔。
- [0143] 7. 如项1所述的方法，其中所述石墨烯层包括多于一层的石墨烯，并且在所述石墨烯层上形成所述单晶膜包括使用所述石墨烯层作为所述单晶膜的晶种。
- [0144] 8. 如项7所述的方法，其中所述石墨烯层包括单晶石墨烯。
- [0145] 9. 如项1所述的方法，其中在所述石墨烯层上形成所述单晶膜包括使用所述第二衬底和所述石墨烯层的组合作为所述单晶膜的晶种。
- [0146] 10. 如项1所述的方法，其中形成所述单晶膜包括在所述石墨烯层上沉积所述第二衬底的材料。
- [0147] 11. 如项1所述的方法，其还包括：
  - [0148] 在所述石墨烯层中形成多个孔，并且
  - [0149] 其中形成所述单晶膜包括在所述多个孔中和所述石墨烯层上沉积材料。
- [0150] 12. 如项1所述的方法，其还包括：
  - [0151] 从所述石墨烯层移除所述单晶膜。
- [0152] 13. 如项12所述的方法，其中从所述石墨烯膜移除所述单晶膜包括剥落所述单晶膜。
- [0153] 14. 如项12所述的方法，其中从所述石墨烯膜移除所述单晶膜包括：
  - [0154] 在所述单晶膜上形成金属应力物；
  - [0155] 在所述金属应力物上设置柔性胶带；以及
  - [0156] 用所述柔性胶带将所述单晶膜和所述金属应力物拉离所述石墨烯层。
- [0157] 15. 如项12所述的方法，其还包括：

- [0158] 将所述单晶膜沉积在第三衬底上。
- [0159] 16. 如项12所述的方法,其还包括:
- [0160] 在所述石墨烯层上形成另一个单晶膜。
- [0161] 17. 如项1所述的方法,其还包括:
- [0162] 在所述单晶膜上沉积材料。
- [0163] 18. 如项1所述的方法,其还包括:
- [0164] 从所述第二衬底移除所述单晶膜和所述石墨烯层。
- [0165] 19. 一种通过如项1所述的方法形成的半导体设备。
- [0166] 20. 一种半导体加工方法,所述方法包括:
- [0167] 在碳化硅衬底上形成石墨烯单层;
- [0168] 将所述石墨烯单层从所述碳化硅衬底转移到半导体衬底;
- [0169] 在所述石墨烯单层中形成多个孔;
- [0170] 在所述石墨烯单层上形成半导体材料的第一单晶层,所述半导体衬底充当所述半导体材料的第一单晶层的晶种;
- [0171] 从所述石墨烯单层移除所述半导体材料的第一单晶层;
- [0172] 在所述石墨烯单层上形成半导体材料的第二单晶层,所述半导体衬底充当所述半导体材料的第二单晶层的晶种;以及
- [0173] 从所述石墨烯单层移除所述半导体材料的第二单晶层。
- [0174] 21. 如项20所述的方法,其中从所述石墨烯单层移除所述半导体材料的第一单晶层包括剥离所述半导体材料的第一单晶层。
- [0175] 22. 如项20所述的方法,其还包括:
- [0176] 在所述石墨烯单层中形成多个孔,并且
- [0177] 其中形成所述半导体材料的第一单晶层包括在所述多个孔中沉积材料。
- [0178] 23. 一种通过如项20所述的方法形成的设备。
- [0179] 24. 一种半导体加工方法,所述方法包括:
- [0180] 在第一衬底上形成石墨烯层;
- [0181] 将所述石墨烯层从所述第一衬底转移到第二衬底;
- [0182] 在所述石墨烯层上沉积半导体层;
- [0183] 在所述半导体层上沉积应力物层,所述应力物层在所述半导体层与所述石墨烯层之间引起裂纹扩展;以及
- [0184] 在所述应力物层上设置柔性胶带;以及
- [0185] 用所述柔性胶带将所述半导体层和所述应力物层拉离所述石墨烯层。

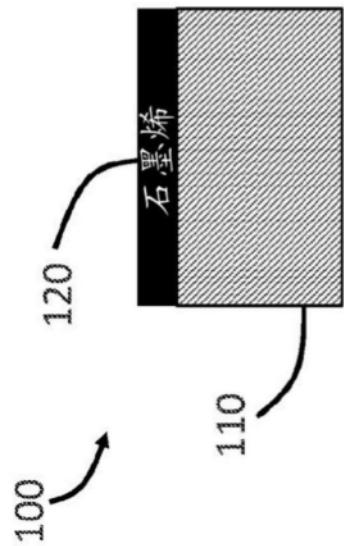


图1A

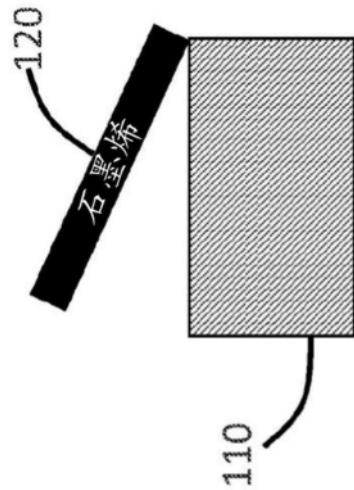


图1B

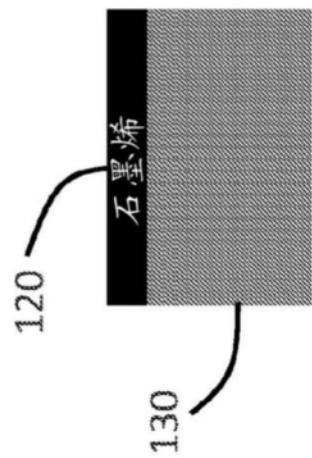


图1C

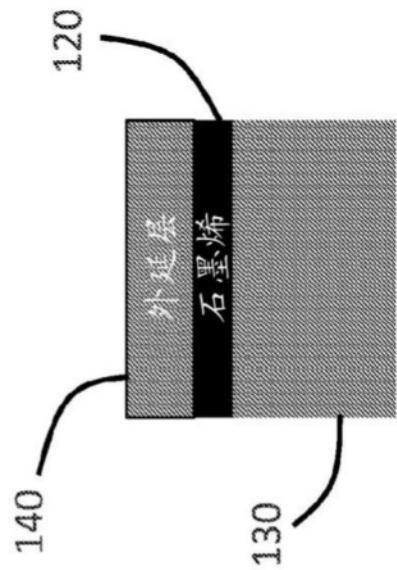


图1D

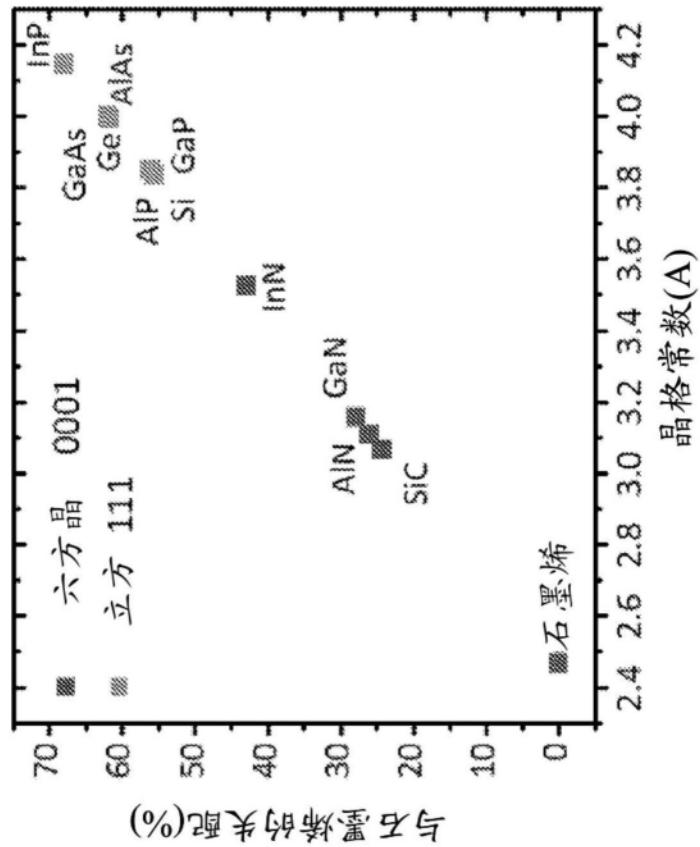


图2

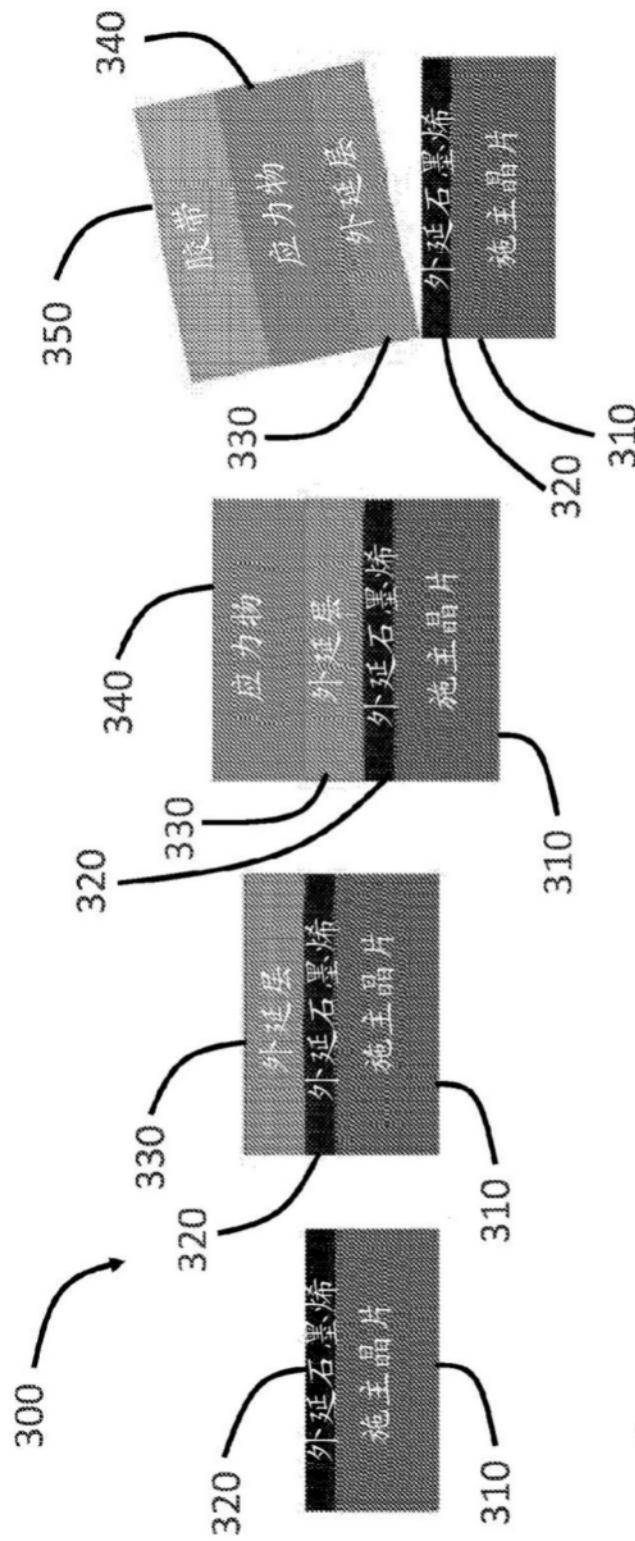


图 3A

图 3B

图 3C

图 3D

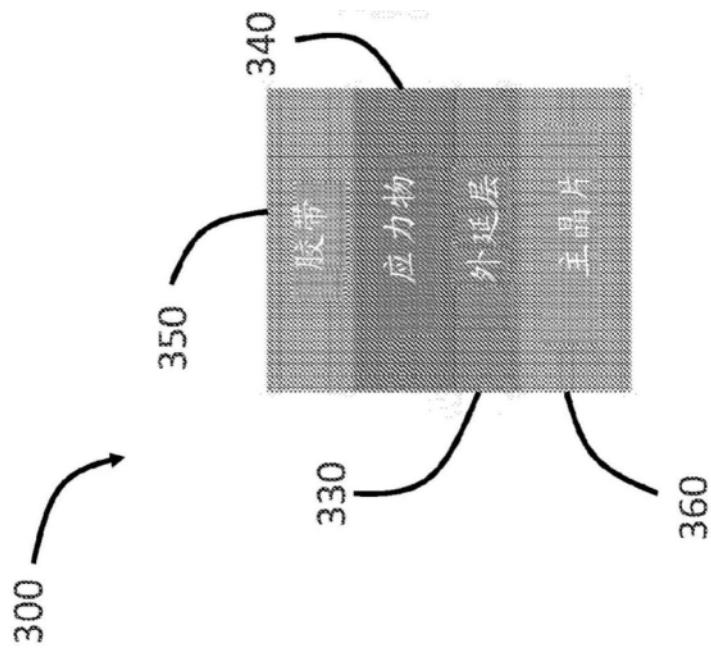


图3E

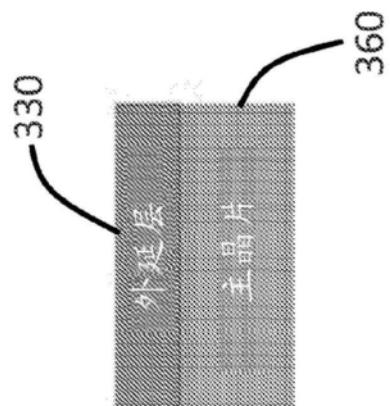


图3F

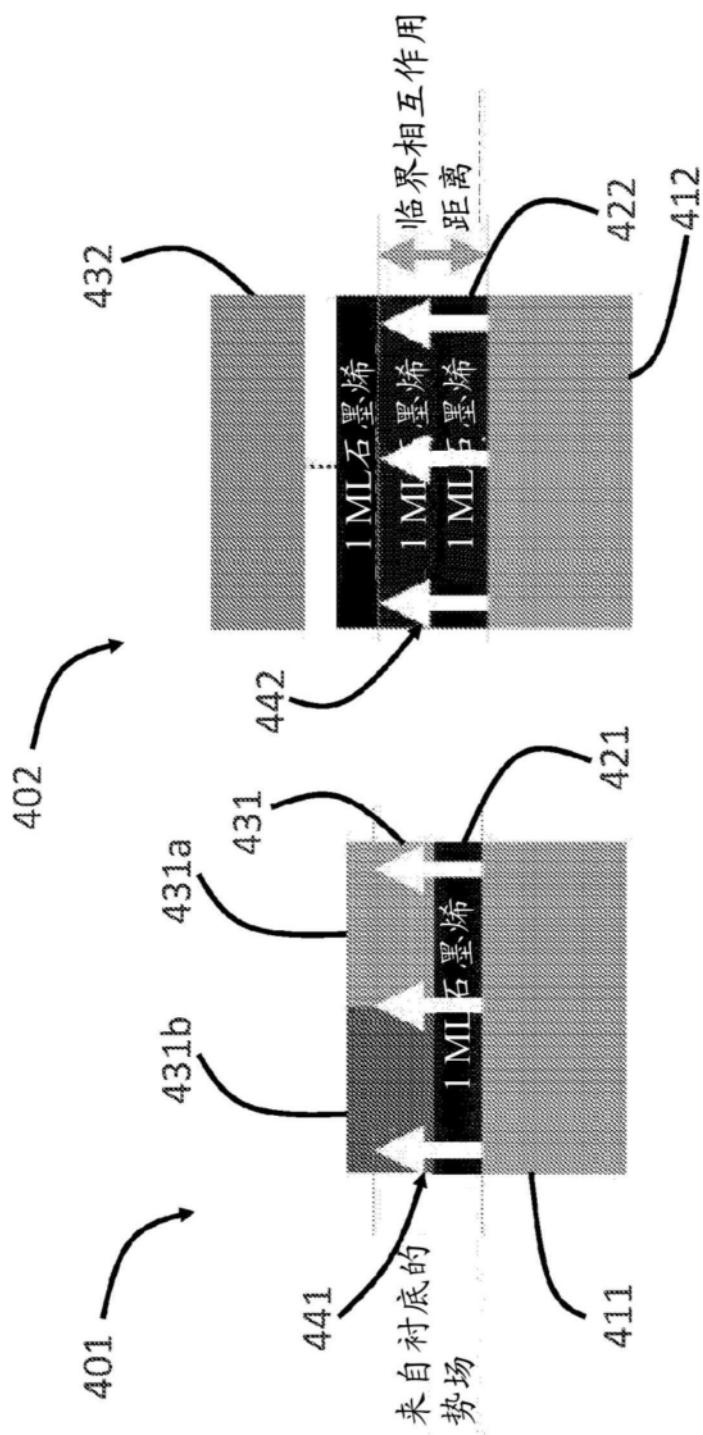


图 4B

图 4A

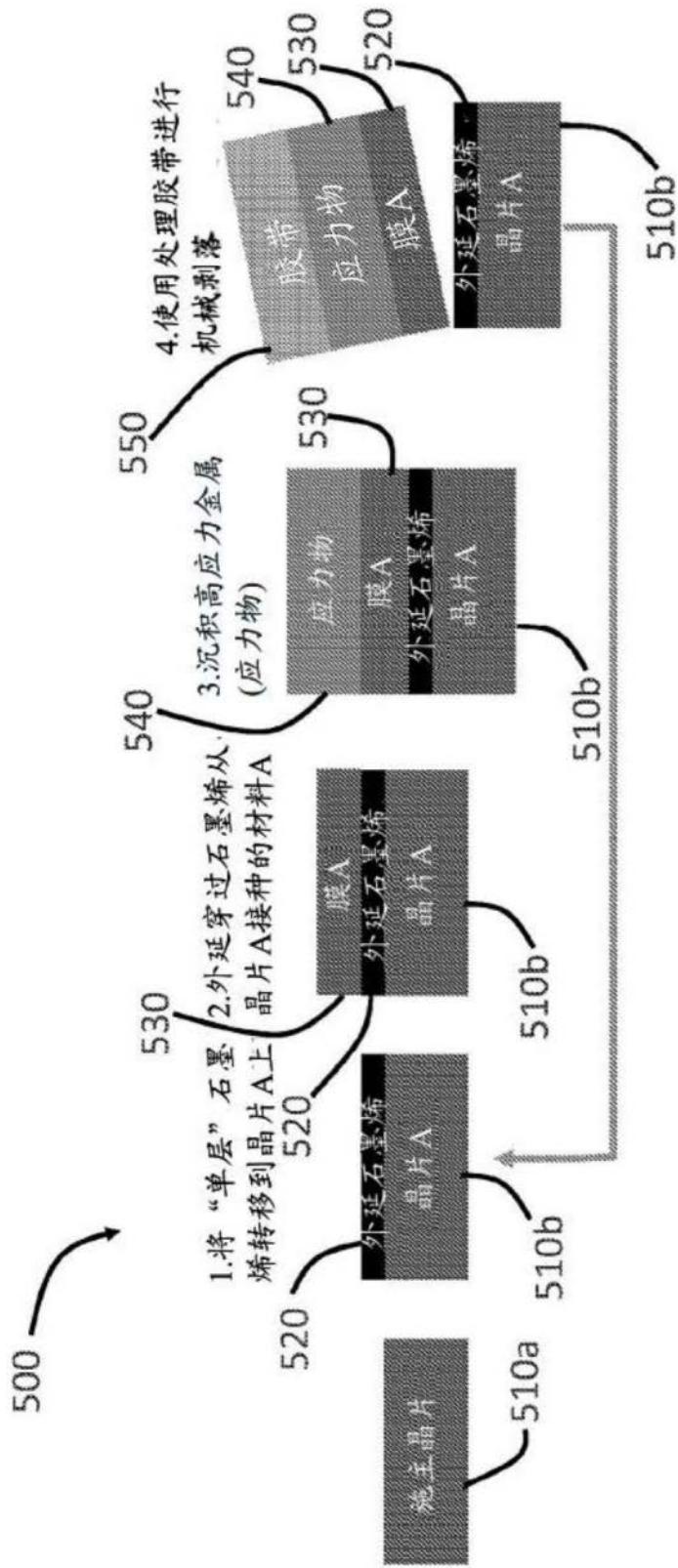


图 5A 图 5B 图 5C 图 5D 图 5E

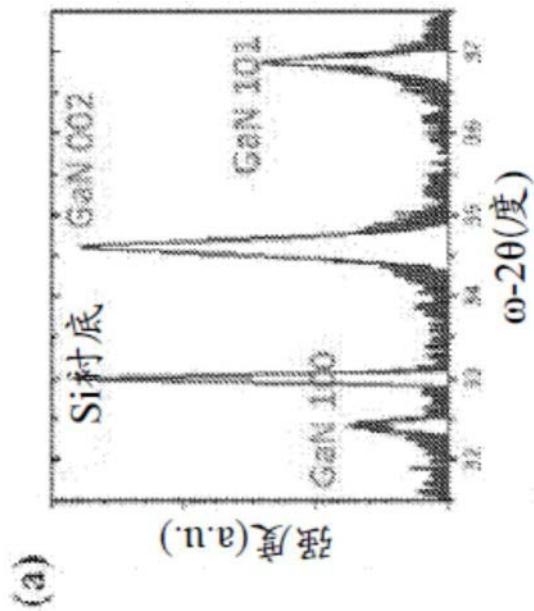


图6A

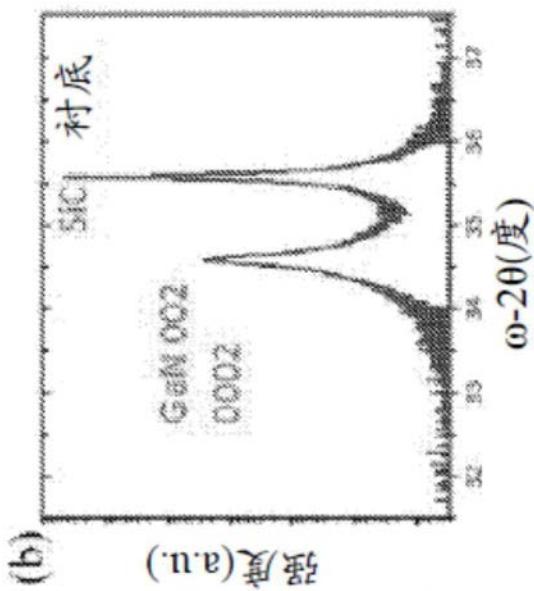


图6B

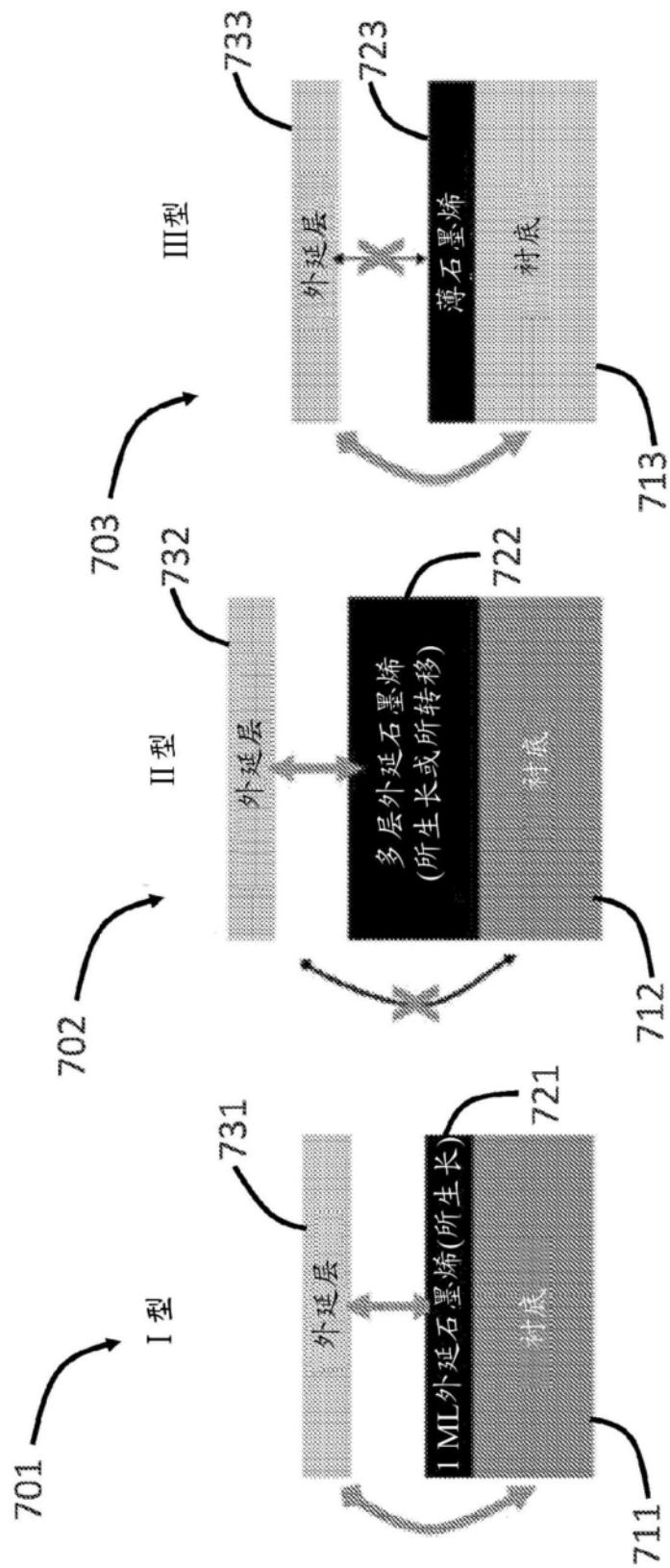


图 7A

图 7B

图 7C

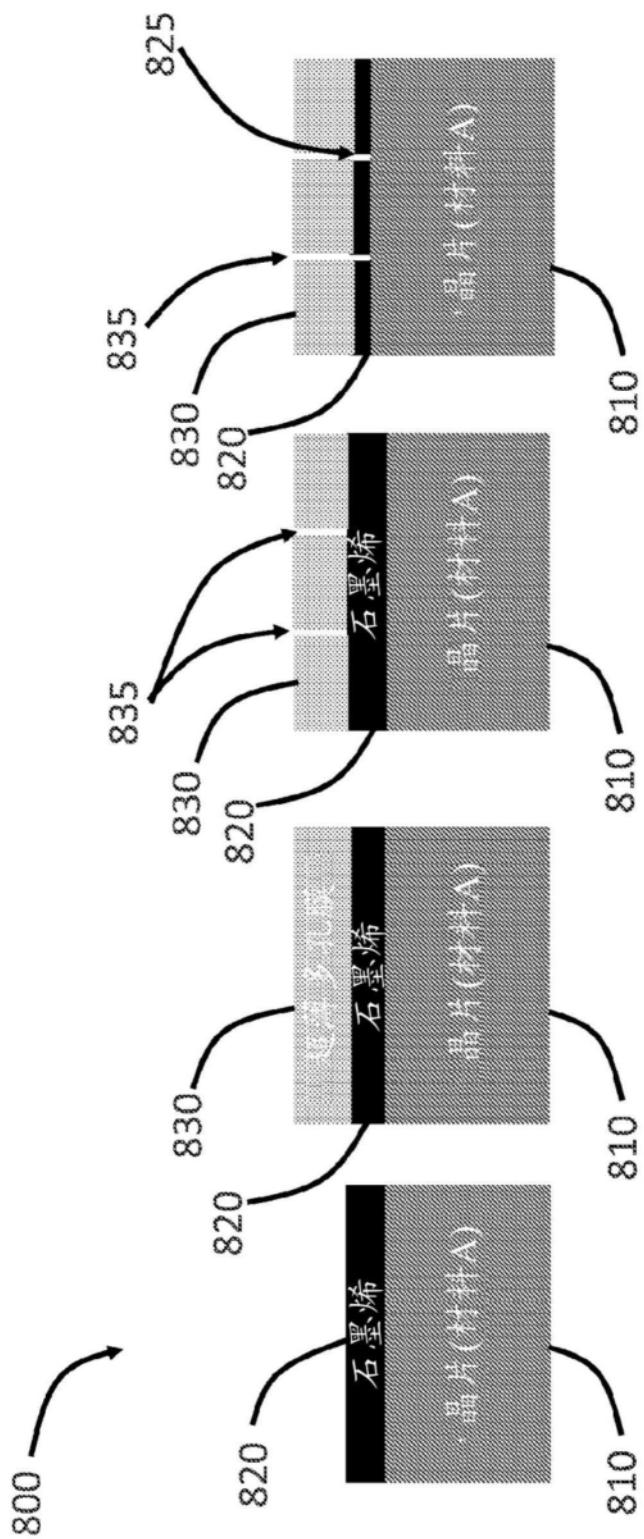


图 8A

图 8B

图 8C

图 8D

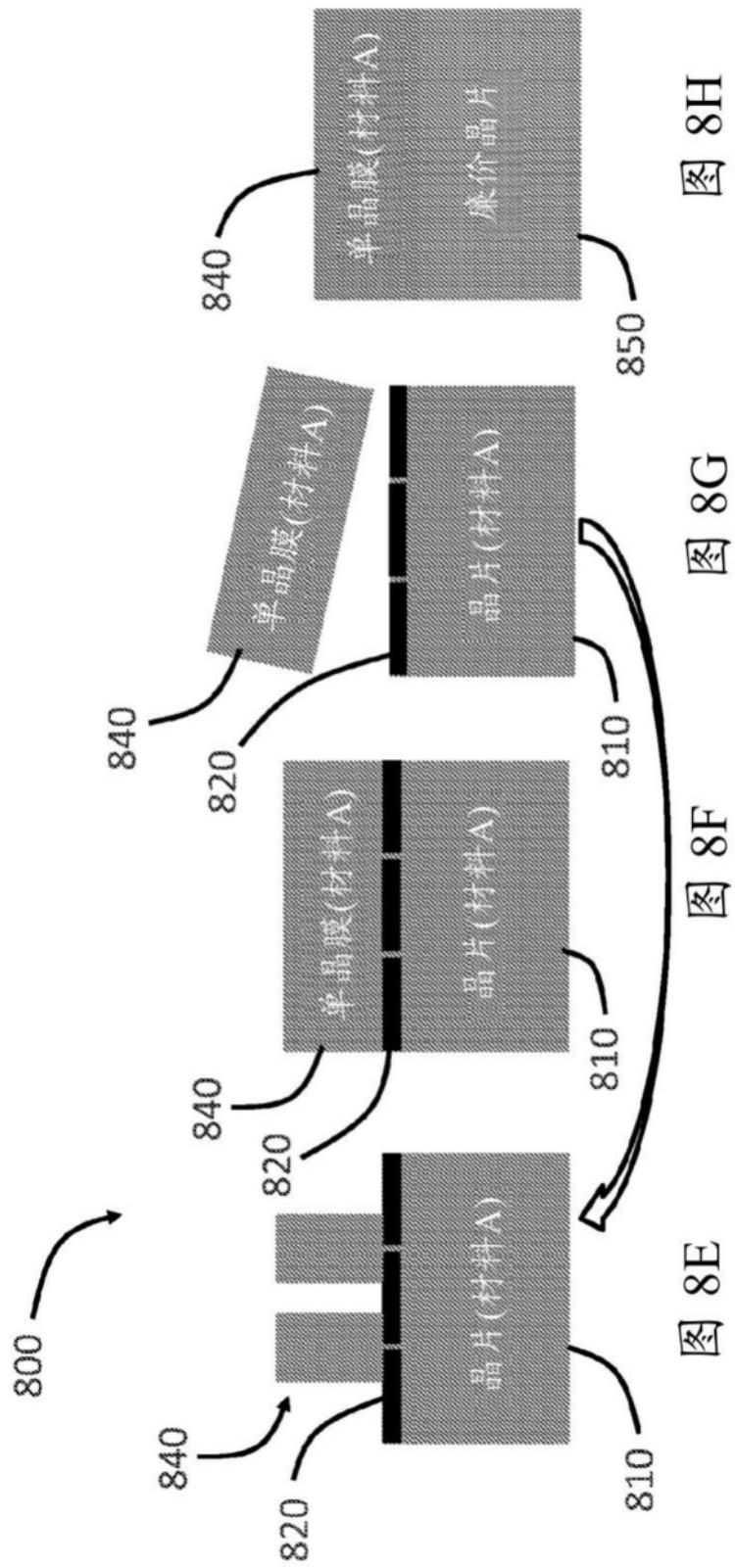


图 8E

图 8F

图 8G

图 8H

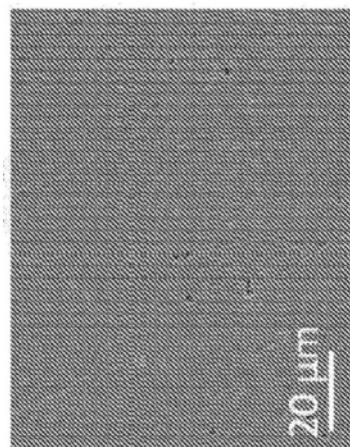


图9A

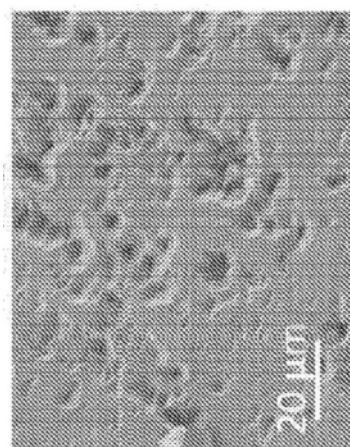


图9B

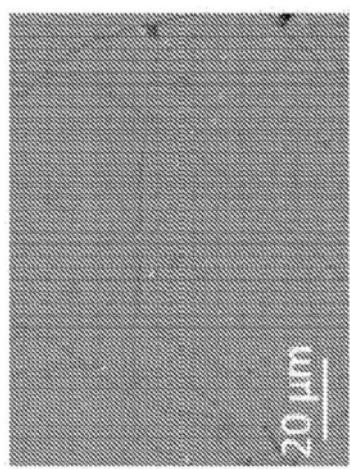


图10A

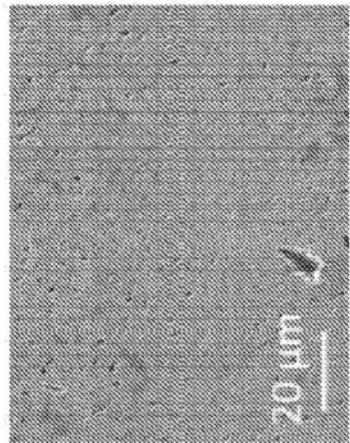


图10B

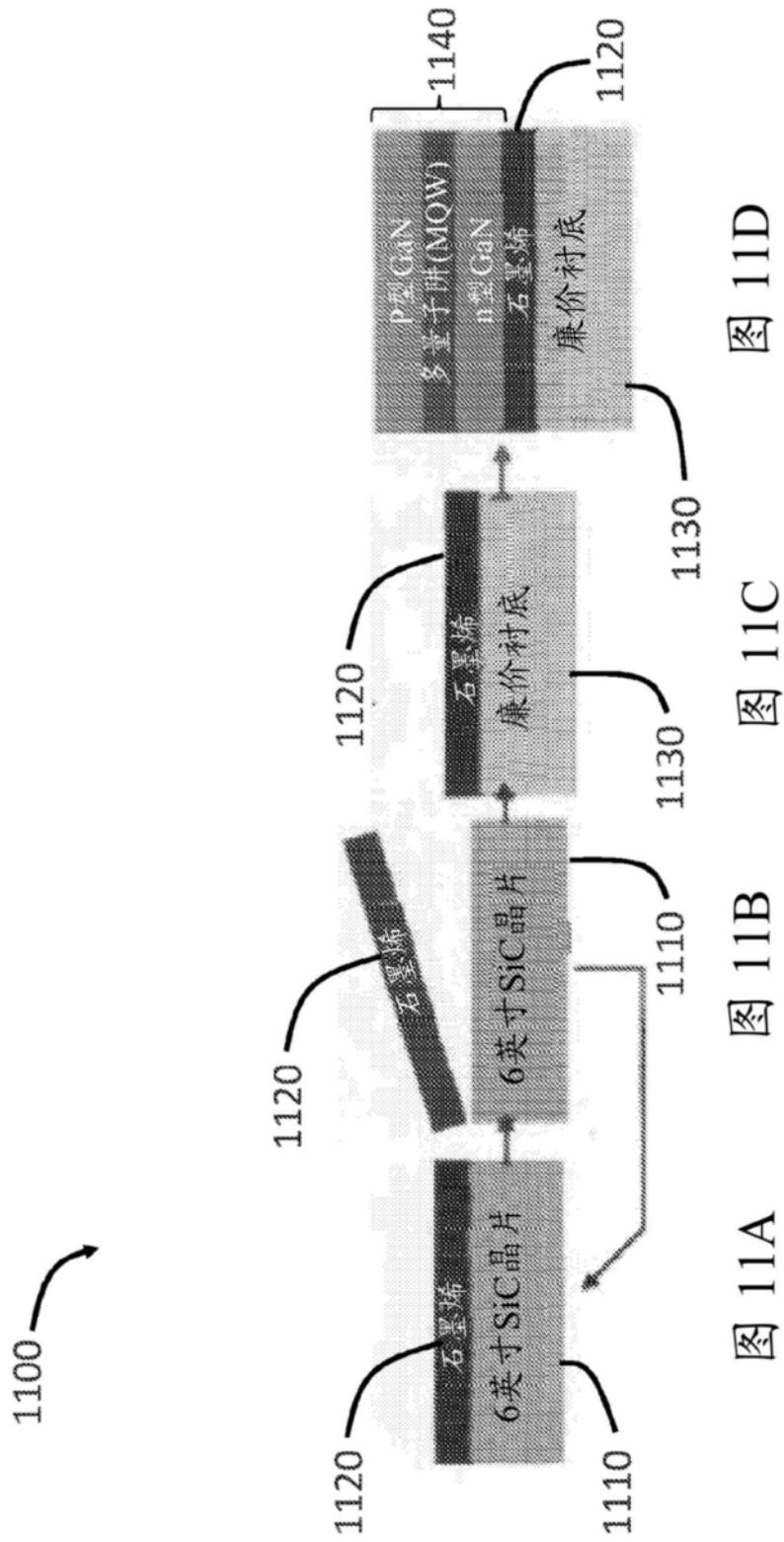
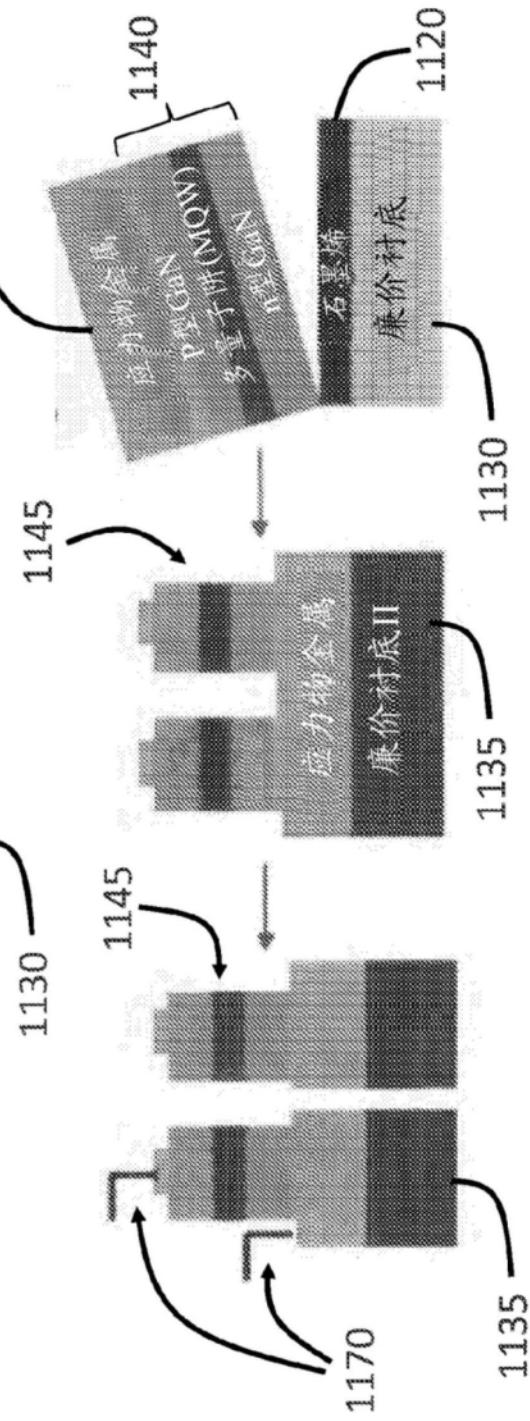
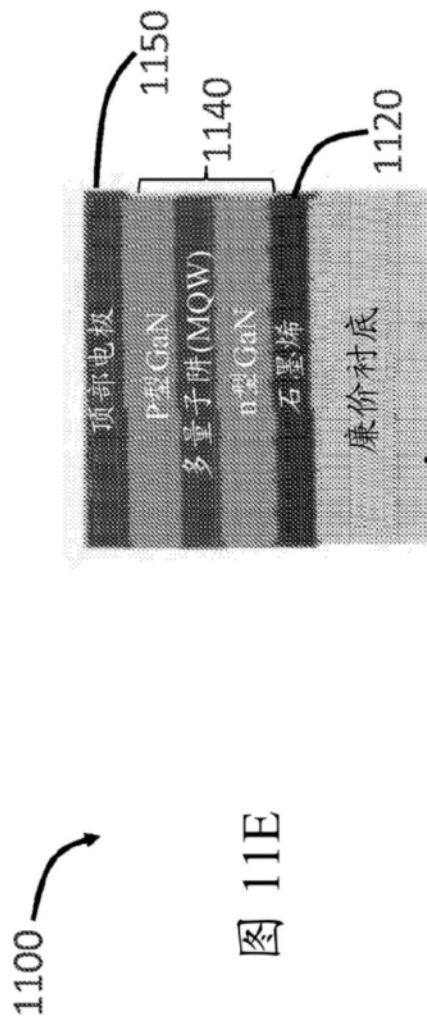


图 11A 图 11B 图 11C

图 11D



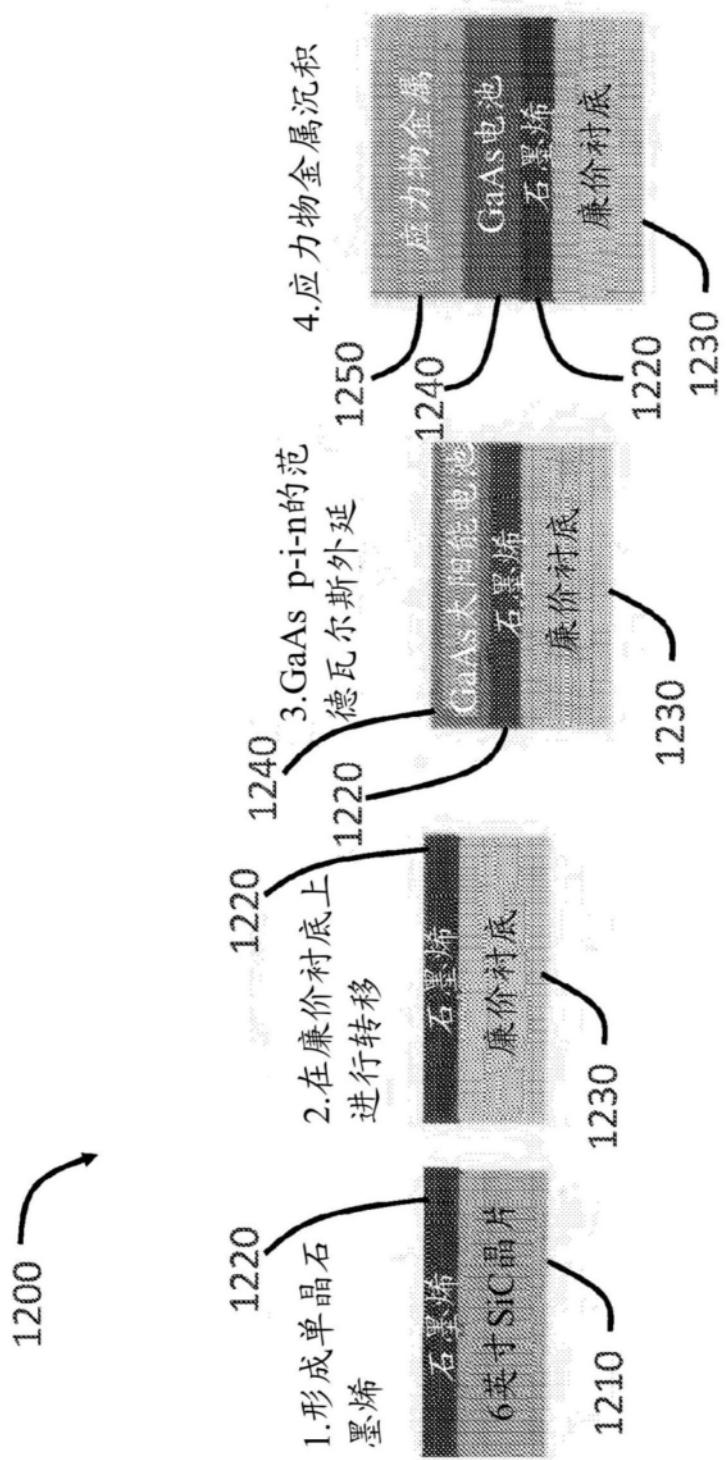
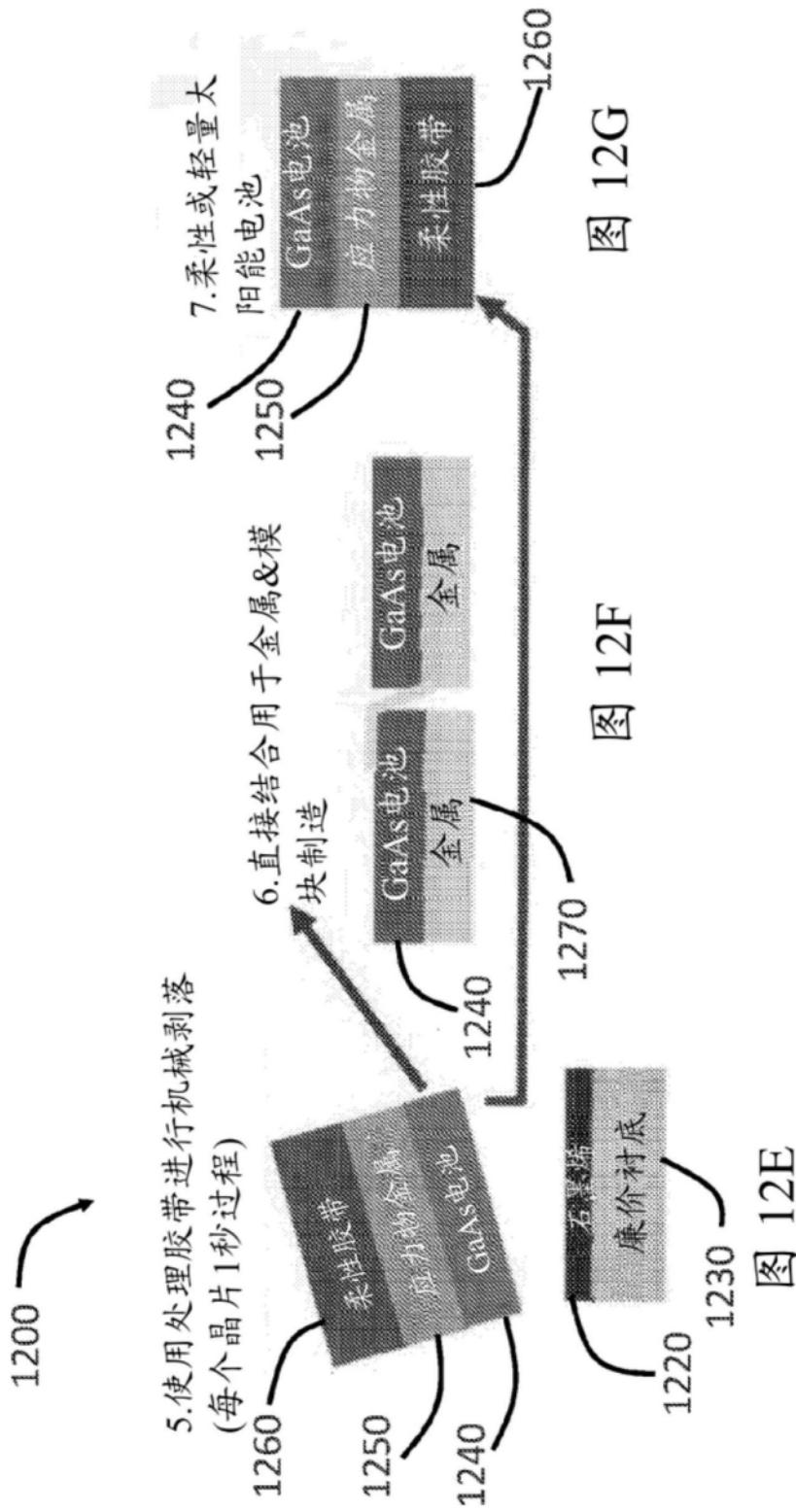


图 12A

图 12B 图 12C

12D



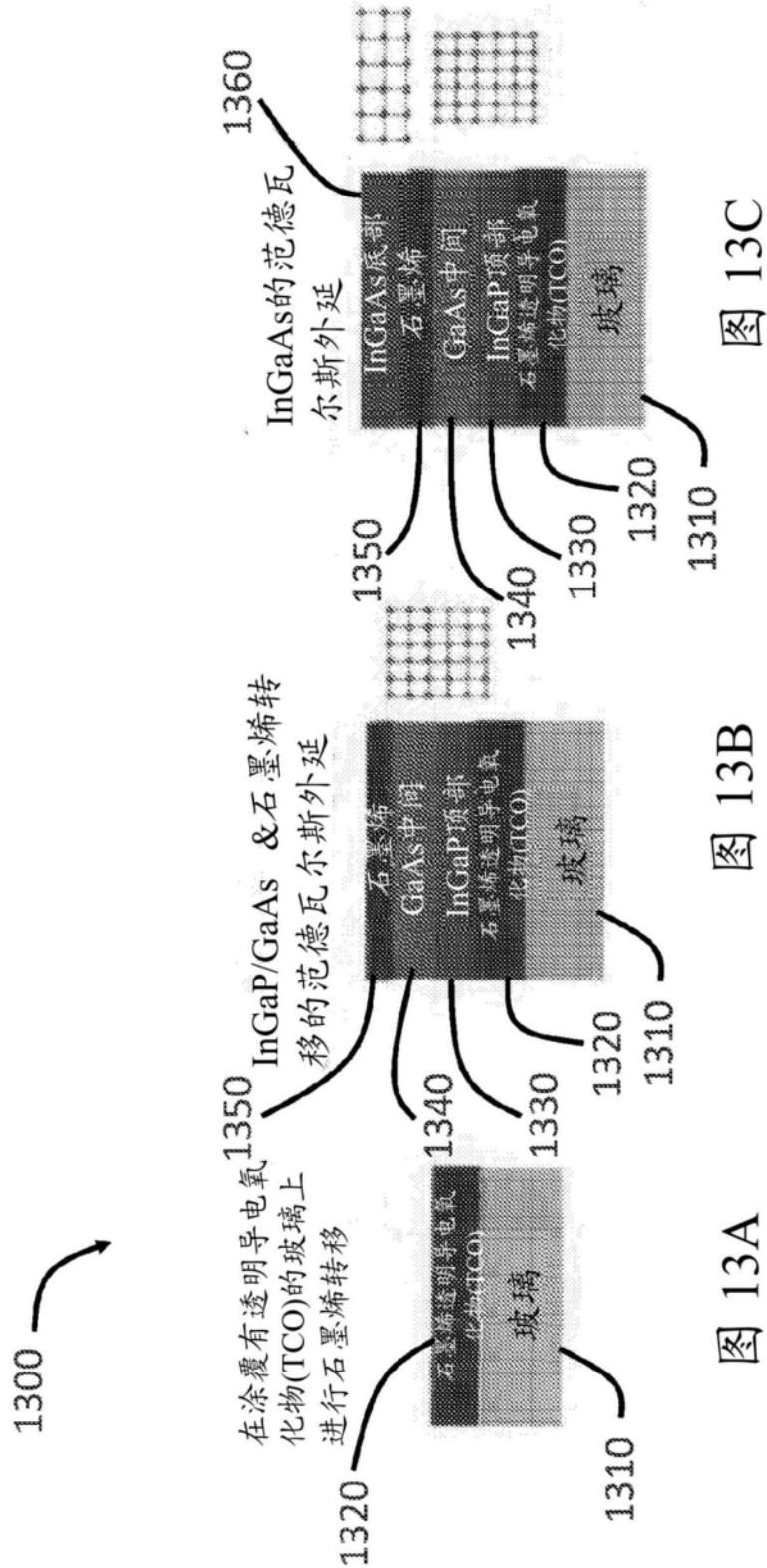


图 13A

图 13B

图 13C

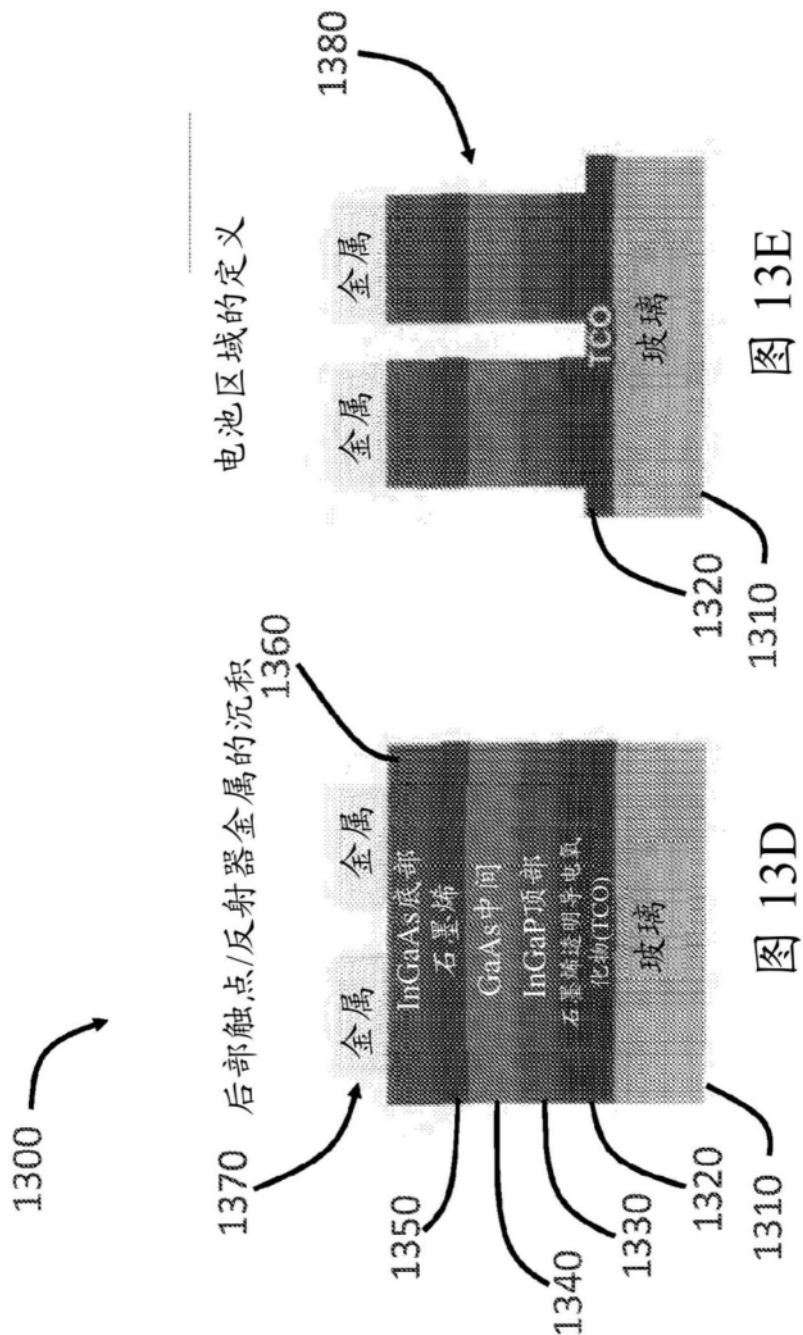
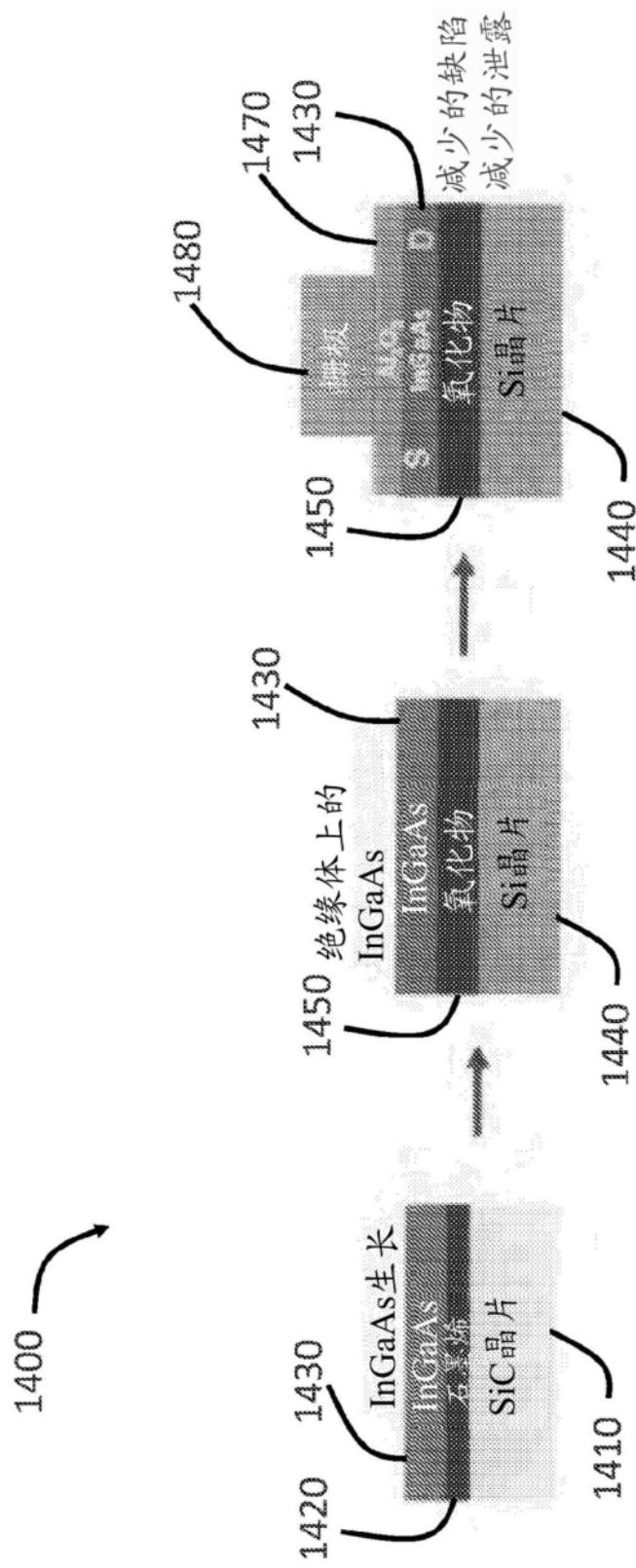


图 13D

图 13E



14A

14B  
圖

14C

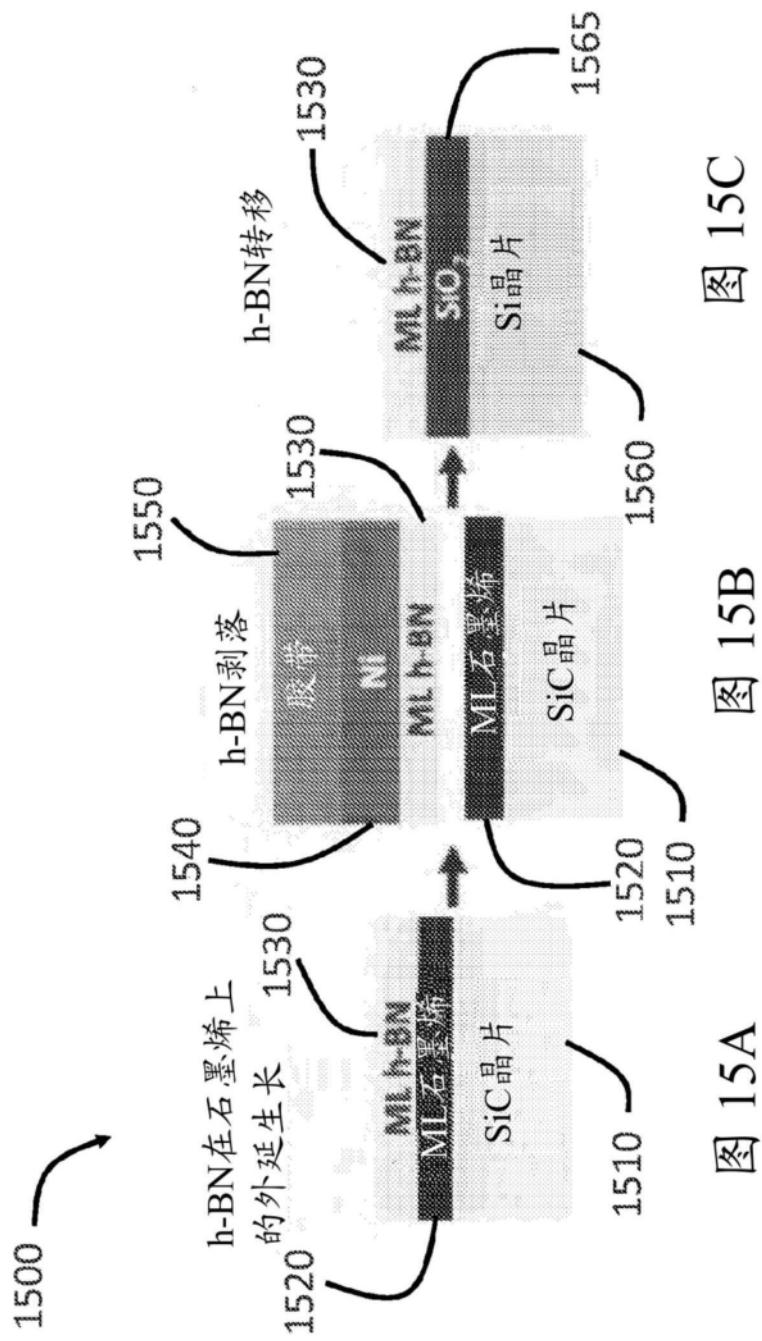


图 15A

图 15B

图 15C

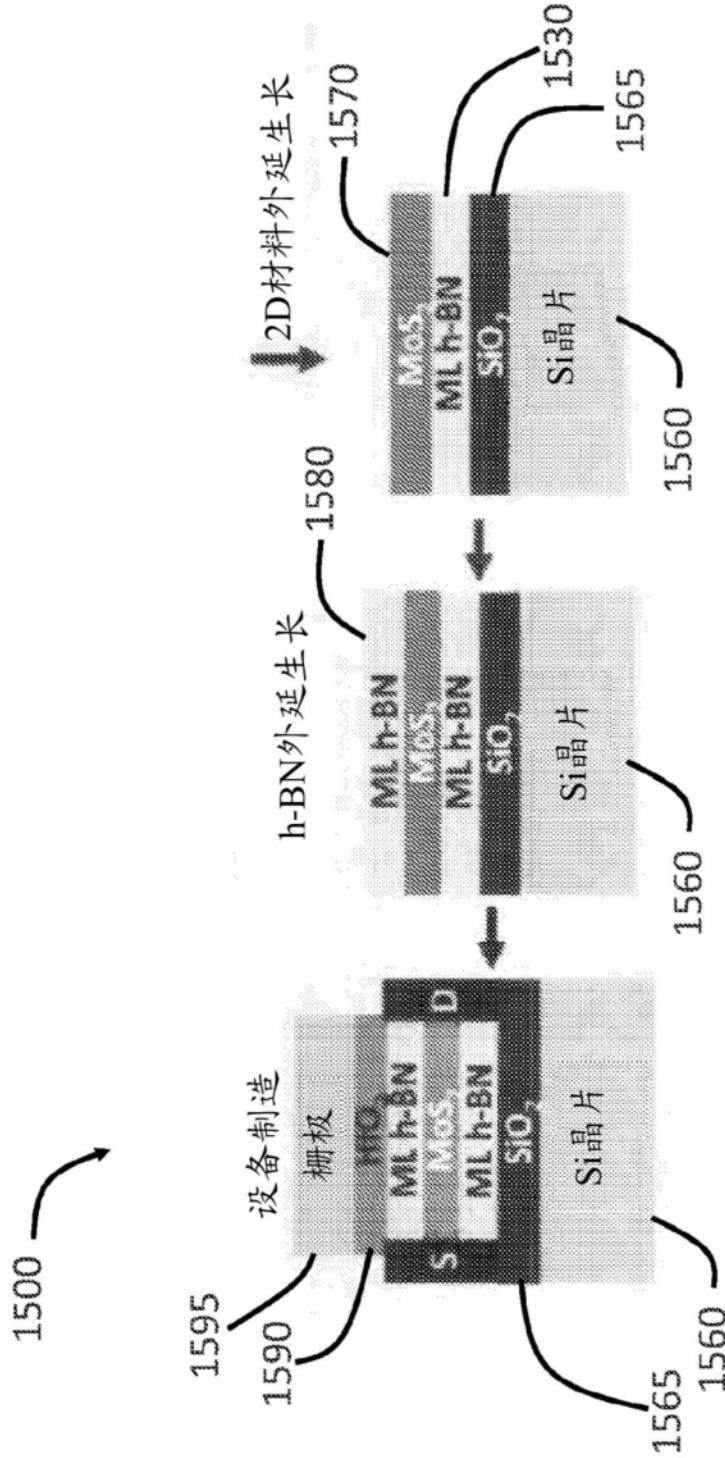


图 15D



图 15E

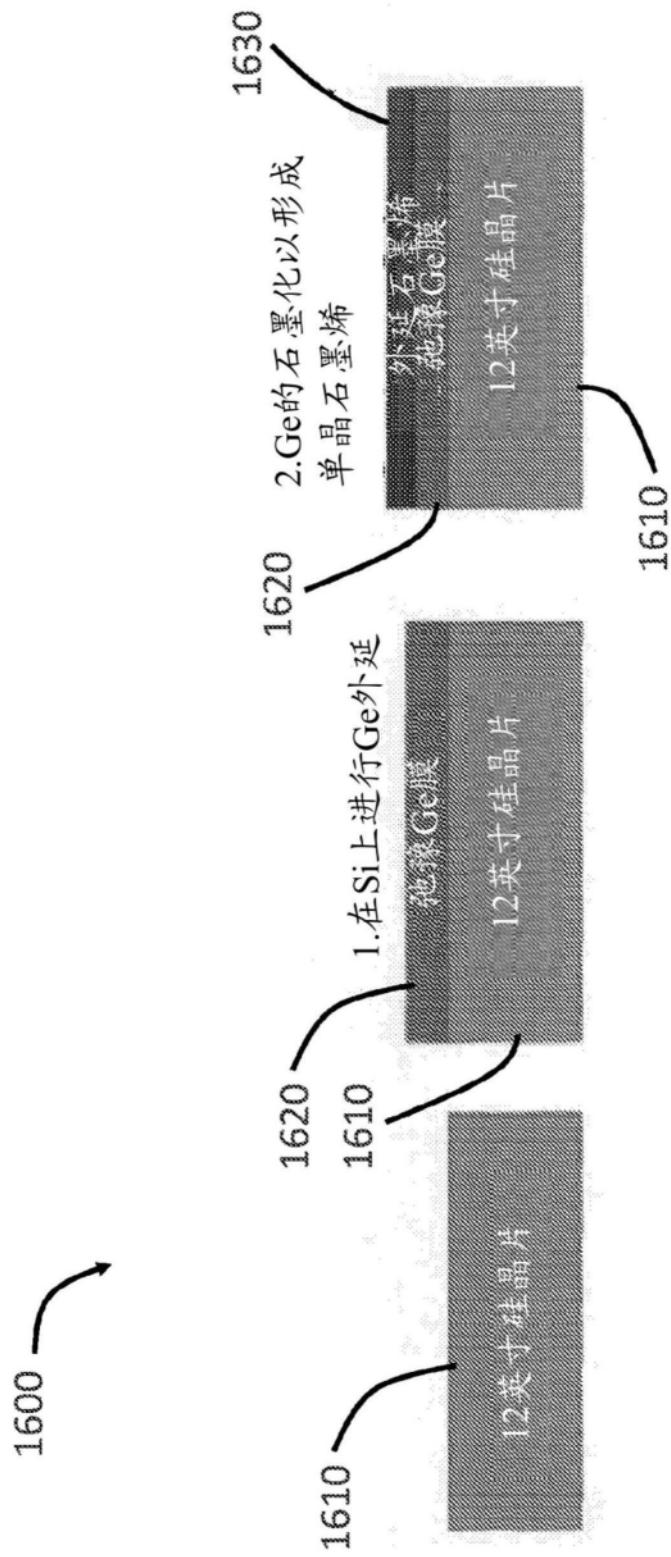


图 16A

图 16B

图 16C

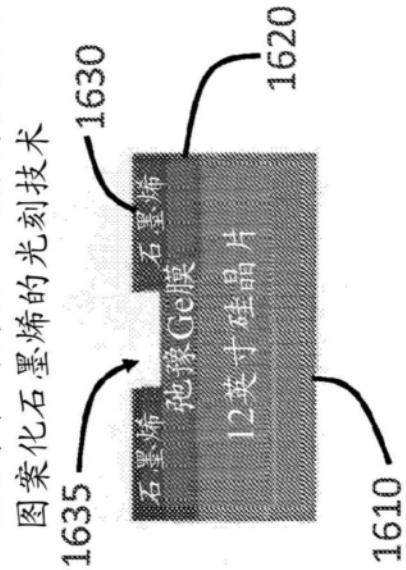


图 16D

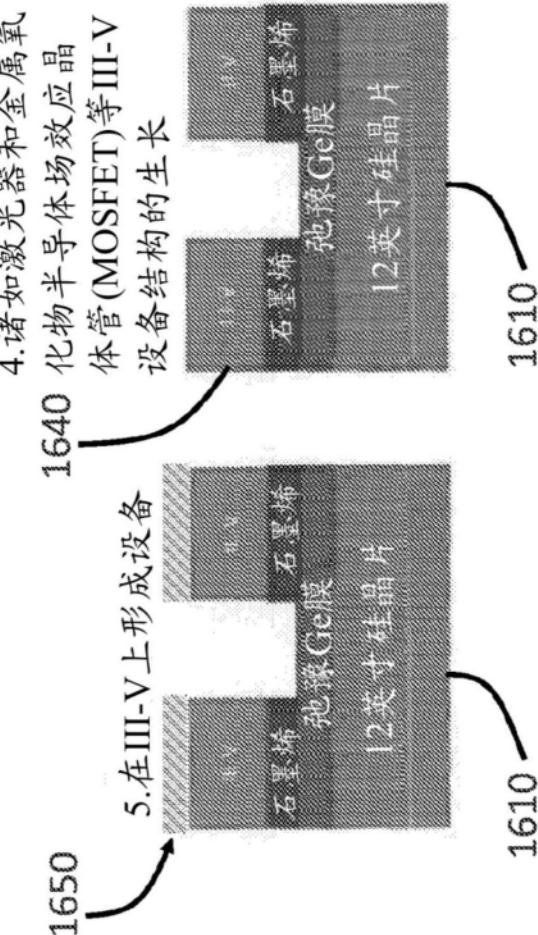


图 16E



图 16F