



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113454793 B

(45) 授权公告日 2025. 02. 18

(21) 申请号 201980092592.5	(73) 专利权人 忠南大学校产学协力团
(22) 申请日 2019.10.25	地址 韩国大田
(65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 113454793 A	(72) 发明人 尹顺吉 朴昞柱 韩艺瑞
(43) 申请公布日 2021.09.28	(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
(30) 优先权数据 10-2019-0019924 2019.02.20 KR	专利代理师 程纾孟
(85) PCT国际申请进入国家阶段日 2021.08.19	(51) Int.Cl. H10D 30/67 (2025.01) H10D 62/83 (2025.01) H01L 21/324 (2006.01)
(86) PCT国际申请的申请数据 PCT/KR2019/014120 2019.10.25	(56) 对比文件 CN 105070766 A, 2015.11.18 CN 108461446 A, 2018.08.28
(87) PCT国际申请的公布数据 W02020/171341 KO 2020.08.27	审查员 彭雨佳

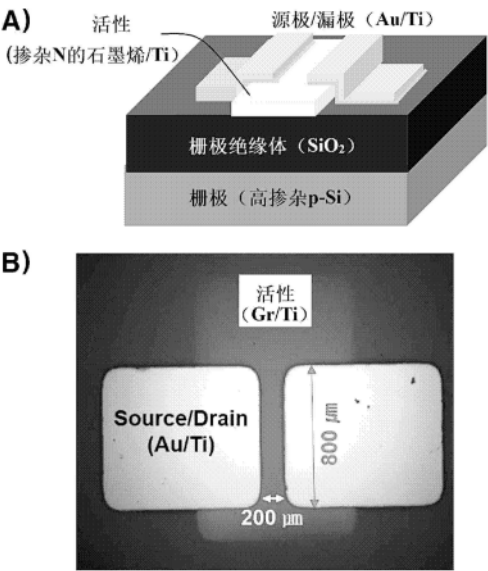
权利要求书1页 说明书8页 附图9页

(54) 发明名称

包括掺杂氮的石墨烯层作为有源层的基于石墨烯的TFT

(57) 摘要

本发明涉及包括掺杂氮的石墨烯层作为有源层的高品质、高性能性的基于石墨烯的薄膜晶体管(TFT, thin film transistor), 更详细地涉及基于石墨烯的TFT, 其包括: 栅电极; 栅极绝缘层, 位于上述栅电极上; 有源层, 位于上述栅极绝缘层上的一部分区域, 包括氮-掺杂石墨烯层; 第一电极, 位于上述有源层的一侧区域上; 第二电极, 位于上述有源层的另一侧区域上。在这种本发明中, 可在Ti层上使石墨烯直接生长, 通过远程等离子体使其受到损伤之后, 利用氮气掺杂来制备石墨烯有源层, 由此可得到具有非常优秀的特性的TFT。



1. 一种基于石墨烯的TFT,其特征在于,包括:

栅电极;

栅极绝缘层,位于所述栅电极上;

有源层,位于所述栅极绝缘层上的一部分区域,包括氮-掺杂石墨烯层;

第一电极,位于所述有源层的一侧区域上;

第二电极,位于所述有源层的另一侧区域上,

其中,所述有源层为氮-掺杂石墨烯层/ TiO_{2-x} 层,其中所述氮-掺杂石墨烯层是在无氧气氛中在栅极绝缘层上沉积Ti层之后连续直接生成并掺杂的,并且所述 TiO_{2-x} 层是通过在将所述有源层暴露至外部环境后所述Ti层的部分氧化形成的。

2. 根据权利要求1所述的基于石墨烯的TFT,其特征在于,所述栅电极包括石墨烯层。

3. 根据权利要求1所述的基于石墨烯的TFT,其特征在于,所述第一电极及第二电极包括石墨烯层/ TiO_{2-x} 层。

4. 一种根据权利要求1所述的基于石墨烯的TFT制备方法,其特征在于,有源层形成步骤包括:

附着与待形成于栅极绝缘层上的有源层的形态相对应的荫罩,沉积厚度为3~10nm的钛膜的步骤;

接着,维持无氧气氛,在原位通过远程等离子体辅助化学气相沉积使石墨烯薄膜生长的步骤;

对生长的所述石墨烯薄膜进行远程等离子体处理,使石墨烯薄膜受到规定的损伤的步骤;

在 N_2 气氛中,使受到损伤的所述石墨烯薄膜暴露于远程等离子体中,掺杂氮的步骤。

5. 根据权利要求4所述的基于石墨烯的TFT制备方法,其特征在于,在所述有源层形成步骤之后,还包括如下步骤:形成第一电极和第二电极之后,在 $100^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 中以规定时间进行退火的步骤。

包括掺杂氮的石墨烯层作为有源层的基于石墨烯的TFT

技术领域

[0001] 本发明涉及包括直接生长于Ti层上之后掺杂氮的石墨烯层作为有源层的高品质、高功能性的基于石墨烯的TFT。

背景技术

[0002] 最近,随着急速的信息化技术发展,进入何时何地都可接触到信息的泛在计算时代。由此传递多种信息的信息传递介质和存储介质等新的电子元件的重要性逐渐变大。尤其,消费者对显示器的要求超出市场的供给和技术的水平,开发的重要性日益变大。下一代显示器除了轻而薄的厚度和高分辨率、快速屏幕切换速度、大面积特性之外,还被强烈要求实现环保、低功耗、超高分辨率、低成本的大面积化、柔性、设计、透明性及实际影像(三维, 3-Dimension)等。

[0003] 薄膜晶体管(TFT, thin film transistor)为搭载于显示器中的背板(backplane),供给电力等的主电路基板,负责显示器驱动的核心作用。因此若想实现作为下一代显示器的核心技术的超高分辨率、快速屏幕切换速度、大屏幕特性等,薄膜晶体管的技术需要进一步发展。以往,开发作为有源层(active layer,活性层)利用非晶硅的薄膜晶体管、低温多晶硅(LTPS, Low Temperature Poly Si)薄膜晶体管、铟镓锌氧化物(IGZO)薄膜晶体管等,或者这些备受关注。但是,这些仍然制作工序复杂,生产费用高,不仅如此,可挠性高,但相比于玻璃基板等无机基板,难以适用于热稳定性低的树脂基板,由此难以应用于柔性显示器。

[0004] 石墨烯为一个碳原子厚度的二维蜂窝结构的纳米物质,理论上,具有 $\sim 200000\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的电子迁移率、 $\sim 5000\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 的热导率、 $\sim 1.0\text{TPa}$ 的杨氏模量和物理化学稳定性,因原子一层水平的厚度而可见光吸收量极少,具有可见光区域的透光率为约98%的突出的特性。尤其石墨烯可比单晶硅使电子快速迁移100倍以上,在这一点上现有的基于硅的半导体器件中代替硅,作为应用为柔韧透明电子元件(flexible, transparent electronic device)的下一代物质备受关注。但是,石墨烯无带隙(band gap)具有金属特性,工作电流的通断比极小,无法利用电信号控制电流的流动,因这一缺点在应用为半导体或晶体管之类的电子元件时具有决定性障碍。

[0005] 对此,多次试图向石墨烯赋予适当的带隙增加工作电流的通断比。例如,试图制作破坏以石墨烯和基板之间晶格失配呈现的石墨烯晶体结构的对称性,或形成纳米带形态图案,或改变石墨烯的化学组成,或使具有半导体特性的特定层和石墨烯层叠的混合结构体的方法等。但是,难以制作优秀品质的石墨烯,难以将制作的石墨烯实现为纳米带结构,难以调整石墨烯的物性,增加的通断比为几~几千左右,仍然差于作为产业上应用的基于硅的TFT的通断比的 10^4 ,成为元件的大量集成化和高速驱动的抑制因素。

发明内容

[0006] 技术问题

[0007] 如所察看,即使以往石墨烯本身具有优秀的特性,也难以供给通断比低且高品质的石墨烯,无法以将石墨烯作为原材料的半导体器件或晶体管实现集成化。

[0008] 对此,本发明的目的在于,提供适用高品质的石墨烯,具有充分用于实用化程度的通断比、低的阈值电压、高的迁移率、低的亚阈值摆幅(subthreshold swing)特性的基于石墨烯的TFT。

[0009] 技术方案

[0010] 用于实现上述目的的本发明,其特征在于,一种基于石墨烯的TFT,包括:栅电极;栅极绝缘层,位于上述栅电极上;有源层,位于上述栅极绝缘层上的一部分区域,包括氮-掺杂石墨烯层;第一电极,位于上述有源层的一侧区域上;第二电极,位于上述有源层的另一侧区域上。

[0011] 发明的效果

[0012] 如上所述的本发明的基于石墨烯的TFT的电荷移动速度快且通断比充分高,可应用为高集成半导体、晶体管等。

[0013] 并且,根据本发明,当形成有源层时,在同一设备内连续合成石墨烯,其中掺杂氮,可通过简化制作工序减少制备费用,实现产品的高品质化。

附图说明

[0014] 图1为本发明的薄膜晶体管的概念立体图。

[0015] 图2和图3分别为表示用于在本发明的实施例中确定晶体管制作工序条件的预实验结果的图表。

[0016] 图4~图6分别为根据本发明的实施例制作的薄膜晶体管的概念图。

[0017] 图7~图9分别为表示根据本发明的实施例制作的薄膜晶体管的工作特性的图表。

[0018] 图10为表示本发明的实施例中制作例3元件的稳定性的图表。

[0019] 附图标记的说明

[0020]	110:基板	120:栅电极
[0021]	130:栅极绝缘层	140:有源层
[0022]	151:第一电极	152:第二电极

具体实施方式

[0023] 以下,参照附图,更详细说明本发明。但是,这种说明仅为用于容易说明本发明的技术思想的内容和范围的例示,本发明的技术范围并不限于此,或者变更。基于这种例示,在本发明的技术思想的范围内可进行多种变形和变更,这对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说是显而易见的。在以下图中,各个结构要素的大小或厚度,形状等可夸张或简化。

[0024] 在本说明书中,“上部”或“上”或“上面”除了相互直接接触而正好位于其上之外,还可包括将另一层作为介质非接触地位于其上。并且,在本说明书中,“A(层)/B(层)”意味着(A)层直接接触在B(层)上而层叠。

[0025] 本发明涉及一种TFT,其特征在于,具有包括氮-掺杂石墨烯层的有源层。更具体地,本发明的特征在于,基于石墨烯的TFT,包括:栅电极;栅极绝缘层,位于上述栅电极上;

有源层,位于上述栅极绝缘层上的一部分区域,包括氮-掺杂石墨烯层;第一电极,位于上述有源层的一侧区域上;第二电极,位于上述有源层的另一侧区域上。

[0026] 图1表示本发明一实施例的薄膜晶体管的概念立体图。图1所例示的薄膜晶体管为栅电极120设置于有源层140下方的底(bottom)栅结构的薄膜晶体管。在基板110上可设有栅电极120。基板110可以为玻璃基板,但可以为其之外的其他基板,例如,塑料基板或硅基板等常规的半导体元件工序中使用的多种基板中之一。栅电极120可由一般的导电性物质,例如,金属、多晶硅、导电性氧化物等形成,在本发明的实施例中,适用高掺杂(highly-doped)p-Si和直接生长的石墨烯。

[0027] 设有覆盖上述栅电极120的栅极绝缘层130。栅极绝缘层130可包括氧化硅层、氮氧化硅层或氮化硅层,但还可包括其之外的其他物质层,例如,介电常数大于氮化硅层的高介电物质层。栅极绝缘层130可具有这种高介电物质层中的至少两层以上层叠的结构。在本发明的实施例中适用 SiO_2 和 Al_2O_3 。

[0028] 在本发明的TFT的栅极绝缘层130上设有包括氮-掺杂石墨烯层的有源层140。此时上述氮-掺杂石墨烯层优选为根据原位(in-situ)生长法而成的层,即,在无氧气氛下沉积石墨烯层,并连续掺杂而成的层,例如在同一设备内连续沉积石墨烯层,并掺杂氮而成的层。

[0029] 在图中,表示有源层140的宽度略微小于栅电极120的宽度,但根据情况,可与栅电极120的宽度类似或大于栅电极120的宽度。

[0030] 在本发明的TFT的有源层140上可设有在第一区域及第二区域以相互隔开的状态相向地与有源层140相接触的第一电极151及第二电极152。第一电极151可与有源层140的一端相接触,第二电极152可与有源层140的另一端相接触。第一电极151及第二电极152可由一般的导电性物质,例如,金属、多晶硅、导电性氧化物等形成。在本发明的实施例中,作为第一电极151及第二电极152适用Au/Ti和石墨烯/Ti。

[0031] 当第一电极151及第二电极152包括导电性物质层和Ti层时,优选地,在无氧气氛中沉积Ti层,接着沉积导电性物质层,例如,在同一设备内连续沉积Ti和导电性物质。

[0032] 第一电极151、第二电极152及栅电极120可以为相同的物质层。第一电极151及第二电极152可以为单层或多层。第一电极151及第二电极152的形态及位置可不同。例如,第一电极151可具有在有源层140的一端向与其相邻的栅极绝缘层130区域上延伸的结构,与其类似地,第二电极152可具有在有源层140的另一端向与其相邻的栅极绝缘层130区域上延伸的结构。并且,第一电极151及第二电极152可设置成与其他两个区域相接触而不是有源层140的两端(即,一端及另一端)。

[0033] 虽然在图1中未图示,但本发明的薄膜晶体管还可设有覆盖有源层140的蚀刻停止层。蚀刻停止层起到防止在用于形成第一电极151及第二电极152的蚀刻工序中上述蚀刻使有源层140损伤的作用。蚀刻停止层可包括氧化硅,氮化硅,有机绝缘物等。此时第一电极151和第二电极152通过形成于蚀刻停止层的规定的孔与有源层140电连接。

[0034] 本发明的TFT可设有覆盖暴露的栅电极120、栅极绝缘层130、有源层140、第一电极151及第二电极152的通常的保护层(passivation layer)(省略图示)。保护层可具有氧化硅层、氮氧化硅层、氮化硅层或有机绝缘层,或这些中的至少两个以上层叠的结构。

[0035] 如上所述的本发明的TFT能够以如下所述的方式实现有源层形成步骤。

[0036] 首先,附着与形成于栅极绝缘层上的有源层的形态相对应的荫罩 (shadow mask), 沉积厚度为3~10nm的钛膜。接着,维持无氧气氛,在原位通过远程 (remote) 等离子体辅助化学气相沉积在钛膜上使石墨烯薄膜生长。由此在本发明中在无转印 (transfer) 过程的情况下,石墨烯层将钛层作为介质稳定地紧贴形成于栅极绝缘层上。对如此生长的石墨烯薄膜进行远程等离子体处理,从而使石墨烯薄膜受到规定的损伤。用于适当的损伤的等离子体处理条件记载于以下实施例中。接着使受到损伤的石墨烯薄膜在 N_2 气氛下暴露于远程等离子体而掺杂氮。在无如此转印的过程的情况下,直接原位形成石墨烯层,可实现高品质和高稳定性的TFT。在以下实施例中在形成钛薄膜之前在栅极绝缘层上附着荫罩,但根据情况,在“形成钛薄膜之后~掺杂石墨烯层氮之后”的任意步骤中可选择将有源层图案化的方法。

[0037] 虽然未图示,但确认到如此制作的TFT暴露于外部时,石墨烯层下方的Ti层被部分氧化而转换为 TiO_{2-x} 。对此,在本说明书中,根据时间点,混用表示“石墨烯/Ti”或“石墨烯/ TiO_{2-x} ”。

[0038] 优选地,本发明的TFT在制作之后在100~400°C中经过规定时间的退火过程。其用于去除在第一电极和第二电极沉积过程中有可能产生的等离子体损伤,并不直接影响掺杂N的石墨烯 (N-doped graphene) 的特性。如在以下实施例中所确认,通过适当的退火明显改善晶体管的工作特性。退火温度和时间大致为非对称关系,因而本发明所属技术领域的普通技术人员可选择适当的退火条件。

[0039] 以上,以底栅结构的薄膜晶体管为主说明,但可在栅电极120、栅极绝缘层130、有源层140、第一电极151及第二电极152与图1不同而相反的顶栅结构的薄膜晶体管中也能相同或类似地适用,这对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说是显而易见的。

[0040] 如以下实施例中所确认,对于本发明的薄膜晶体管而言, I_{on}/I_{off} 为 10^9 以上,流动性 (mobility) 为300以上, V_{th} (阈值电压) 为0.3V以下,亚阈值摆幅为0.1V以下,表示非常优秀的特性。因此本发明的薄膜晶体管可用作有源矩阵 (active matrix) 显示器,例如,液晶显示器或有机发光显示器,提供超高清晰度 (UHD, ultra high definition) 影像的下一代高分辨率有源矩阵液晶显示器 (AMLCD, active matrix liquid crystal display)、有源矩阵有机发光二极管 (AMO LED, active matrix organic light emitting diode) 等显示器的像素切换元件或驱动元件。此外,本发明的薄膜晶体管能够以多种用途应用于存储元件及逻辑元件等其他电子元件领域中。

[0041] 实施例

[0042] 制作本发明的薄膜晶体管,评价其特性。

[0043] 1. 薄膜晶体管的制作

[0044] 对于基板-栅层-栅极绝缘层-有源层-电极,分别由下列表1中所示的材质制作本发明的TFT。在制作例1、制作例2中,栅电极起到基板作用。

[0045] 表1

[0046]		制作例 1	制作例 2	制作例 3
	基板			聚酰亚胺
	栅电极	高掺杂 p-Si		石墨烯/Ti
	栅极绝缘层	SiO ₂ (100nm)		Al ₂ O ₃ (~40nm)
	有源层	掺杂 N 的石墨烯/Ti		
	第一电极、第二电极	Au/Ti	石墨烯/Ti	

[0047] 此时,有源层形成工序按照“在栅极绝缘层上形成Ti层→在Ti层上形成石墨烯层→石墨烯层损伤→掺杂石墨烯层”的顺序实现,最小限度地各个过程及过程和过程之间在无氧气氛中执行。

[0048] (1) 有源层的形成

[0049] 在以下制作例中,通过预实验确定石墨烯层的形成、石墨烯层的损伤条件和损伤的石墨烯层的氮-掺杂条件。但是,并不排除如此确定的条件和其他工序条件。

[0050] ①在栅极绝缘层上形成石墨烯/Ti层

[0051] 在150℃下,在以下条件下,以溅射方式将厚度为3~10nm的钛膜沉积于SiO₂(制作例1、制作例2)或Al₂O₃(制作例3)绝缘层上。直流功率(dc power)为20W,工作压力为0.4Pa,沉积时间为3分钟,喷枪和喷枪之间间隔为10cm,等离子体和基板之间间隔为10cm。

[0052] 接着,维持连续的无氧气氛,在下列表2中所提及的条件下,在Ti层上形成石墨烯层。

[0053] 表2

[0054]	参数	石墨烯合成条件
	注入气体	H ₂ /Ar/CH ₄ =10/10/0.3sccm
	工作温度	150℃
	工作压力	1.8torr
	等离子体功率	70W
	工作时间	2h
	T-T距离	10cm
	T-S距离	10cm

[0055] ②石墨烯层的损伤条件的确定

[0056] 为了在掺杂之前确定石墨烯的适当的损伤条件,调节Ar等离子体暴露时间。在图2所示的条件下,Ar等离子体暴露(此时,喷枪和喷枪之间间隔为10cm,等离子体和基板之间间隔为13cm)时间以15秒钟,30秒钟,45秒钟改变,通过拉曼峰,面电阻,透明度确认损伤程度(参照图2)。使各个样品受到损伤之后,与原始(Pristine)石墨烯的特性比较。在Ar等离

子体中暴露15秒钟的样品在拉曼峰和透明度中无变化,但通过面电阻略微上升判断几乎未蚀刻(损伤)。对于暴露30秒钟的样品而言,通过在拉曼峰中生成略微的D峰(peak)(意味着石墨烯的缺陷),可确认生成适当的等离子体损伤,确认到在面电阻和透明度测定中石墨烯也受到损伤。确认到暴露45秒钟的样品在拉曼峰中石墨烯完全蚀刻而消失。因此确认到适当的是,在如上所述的处理条件下,使其受到30秒钟左右,例如25~35秒钟左右的损伤。但是,处理时间可根据处理条件或环境而不同。

[0057] ③石墨烯层的氮-掺杂条件的确定

[0058] 将Ar等离子体处理30秒钟之后,利用N₂等离子体掺杂氮。为了调节适当的掺杂程度,将掺杂时间固定为30秒钟,将N₂气体的量调节为0.3、0.5、1.0sccm。暴露于N₂0.3sccm等离子体中的(此时,喷枪和喷枪之间间隔为10cm,等离子体和基板之间间隔为13cm)样品在G峰1576cm⁻¹中以1580cm⁻¹呈现典型的氮-掺杂峰效果。面电阻同样以氮-掺杂的效果适当增加,掺杂氮之后,透明度与Ar蚀刻之后(掺杂氮之前)的透明度类似。由此确认到暴露于N₂0.3sccm等离子体中的样品不被蚀刻,而是适当掺杂氮。通过拉曼测定确认到暴露于N₂0.5、1.0sccm等离子体中的样品被蚀刻,以使石墨烯消失,形成略微的CN(参照图3)。确认到适当的是,将检查结果气体供给为0.3sccm以下。此时,处理时间同样也可根据处理条件或环境而不同。

[0059] (2) 制作例1

[0060] 根据常规方法,在高掺杂(high doping)的p-Si上以100nm的厚度形成SiO₂绝缘层。接着,在绝缘层上,为了将有源层图案化,将荫罩附着于基板上之后,以上述的条件使Ti层及石墨烯层连续直接生长之后,保持不变地使石墨烯层损伤,在石墨烯层中掺杂氮,以完成有源层。

[0061] 将第一电极/第二电极掩膜(mask)精密地配置于有源层被图案化的基板,在以下提出的条件下,以溅射方式连续沉积Ti层(厚度为10nm)和Au层(厚度为50nm),以形成第一电极和第二电极。[Ti层:直流功率为20W,基础压力为 6.6×10^{-4} pa,工作压力为0.4Pa,沉积时间为3分钟/Au层:直流功率为12W,基础压力为 6.6×10^{-4} Pa,工作压力为0.4Pa,沉积时间为3分30秒]。在本制作例中,将Ti层和Au层适用为第一电极和第二电极,但并不排除用导电性原材料的单层。

[0062] 在制作例1中,使有源层大致为800×1200μm,使第一电极和第二电极大致为800μm(宽度,width)大小,使第一电极和第二电极之间的间隔大致为200μm(长度,length)左右(参照图4的B)。这依据本发明人组所具有的荫罩的尺寸,尺寸越小,TFT特性越得到提高,因而本制作例并不限制有源层或第一电极、第二电极的尺寸。

[0063] 在常温~300℃中将制作的晶体管(参照图4的A)进行退火。

[0064] (3) 制作例2

[0065] 以如上所述的方式在Ti层(厚度为10nm)上使石墨烯层(单层,厚度为0.4nm)直接生长,以形成第一电极和第二电极,除此之外,与制作例1相同地制作(参照图5)。

[0066] (4) 制作例3

[0067] 以如上所述的方式在无氧气氛中以原位将Ti层和石墨烯层形成于聚酰亚胺基板上作为栅电极,以Al₂O₃(厚度为40nm)构成栅极绝缘层,除此之外,与制作例2相同地制作(参照图6)。

[0068] 2. 薄膜晶体管的特性

[0069] 分析根据如此制作的晶体管的传递曲线, 输出曲线及退火条件的晶体管特性等。

[0070] 虽然未图示, 但确认到当如此制作的TFT暴露于外部时, 石墨烯层下方的Ti层被部分氧化而转换为 TiO_{2-x} 。

[0071] (1) 制作例1晶体管

[0072] 如图7所示, 本发明的制作例1晶体管在热处理之前也表示 4.23×10^7 的极高的通断比, 当与 $72\text{cm}^2/\text{V.s}$ 的流动性、1.5V的阈值电压、0.50V/decade的现有掺杂氮的石墨烯相比较时, 呈现非常优秀的特性。可确认当以200、250、300°C热处理制作例1晶体管时, 晶体管的性能逐渐变得优秀。这解释为当对于第一电极和第二电极, 以直流 (DC) 溅射沉积Au、Ti时产生的有源层和电极层界面之间产生的缺陷和沉积电极层时产生的物理压力因热处理而缓解、消除, 以表达掺杂氮的石墨烯晶体管的本来特性。

[0073] 如从下列表3中可见, 可知这种掺杂氮的晶体管的特性中, 电流通断比 ($\text{on/off ratio}, I_{\text{on/off}}$)、流动性、阈值电压 (threshold voltage)、亚阈值摆幅 (Subthreshold swing, S.S.) 等非常优秀。

[0074] 表3

[0075]

参数	无退火	200°C	250°C	300°C
I_{on}	$1.13 \times 10^{-4}\text{A}$	$4.31 \times 10^{-4}\text{A}$	$6.60 \times 10^{-4}\text{A}$	$6.90 \times 10^{-4}\text{A}$
I_{off}	$2.65 \times 10^{-12}\text{A}$	$1.67 \times 10^{-12}\text{A}$	$1.76 \times 10^{-13}\text{A}$	$1.75 \times 10^{-13}\text{A}$
$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	4.23×10^7	4.97×10^8	3.75×10^9	3.84×10^9
流动性	$72\text{cm}^2/\text{V.s}$	$127\text{cm}^2/\text{V.s}$	$301\text{cm}^2/\text{V.s}$	$303\text{cm}^2/\text{V.s}$
V_{th}	1.5V	0.44V	0.41V	0.39V
亚阈值摆幅	0.50V/decade	0.21V/decade	0.11V/decade	0.11V/decade

[0076] (2) 制作例2晶体管

[0077] 如图8所示, 制作例2晶体管由石墨烯/Ti电极代替第一电极和第二电极。如同制作例1晶体管, 可确认当以200、250、300°C热处理时, 温度越高, 晶体管的性能逐渐变得优秀, 其理由如上所述。

[0078] 因此, 确认到石墨烯/Ti电极可充分代替Au/Ti电极。

[0079] 并且, 如从下列表4中可见, 可知即使由石墨烯/Ti电极代替Au/Ti电极, 电流通断比、流动性、阈值电压、亚阈值摆幅等仍然非常优秀。

[0080] 表4

[0081]

参数	无退火	200°C	250°C	300°C
I_{on}	$1.05 \times 10^{-4}\text{A}$	$2.31 \times 10^{-4}\text{A}$	$3.47 \times 10^{-4}\text{A}$	$3.50 \times 10^{-4}\text{A}$
I_{off}	$1.75 \times 10^{-12}\text{A}$	$1.67 \times 10^{-12}\text{A}$	$1.02 \times 10^{-13}\text{A}$	$9.94 \times 10^{-14}\text{A}$
$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	6.00×10^7	1.38×10^8	3.40×10^9	3.52×10^9
流动性	$101\text{cm}^2/\text{V.s}$	$117\text{cm}^2/\text{V.s}$	$291\text{cm}^2/\text{V.s}$	$293\text{cm}^2/\text{V.s}$
V_{th}	1.38V	0.44V	0.34V	0.33V
亚阈值摆幅	0.34V/decade	0.26V/decade	0.10V/decade	0.10V/decade

[0082] (3) 制作例3晶体管

[0083] 如图9所示, 为了实现透明且柔韧的氮-掺杂石墨烯晶体管, 制作例3晶体管由具有

柔性的PI基板和 Al_2O_3 栅极绝缘层代替现有的基于Si的基板和栅极绝缘层,使用石墨烯/Ti第一电极、第二电极制作。与制作例1、制作例2相同,可确认在 250°C 中热处理时,晶体管的性能变得优秀。由于PI基板的劣化现象,在其以上的温度中省略热处理试验。

[0084] 并且,如从下列表5中可见,可知即使适用柔性基板,电流通断比、流动性、阈值电压、亚阈值摆幅等也非常优秀。

[0085] 表5

[0086]

参数	无退火	250°C
I_{on}	$1.53 \times 10^{-7} \text{A}$	$2.29 \times 10^{-4} \text{A}$
I_{off}	$1.14 \times 10^{-12} \text{A}$	$1.01 \times 10^{-13} \text{A}$
$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	1.34×10^5	2.26×10^9
流动性	$44 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$260 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
V_{th}	1.1V	0.8V
亚阈值摆幅	1.07V/decade	0.22V/decade

[0087] 通过负偏压(NBS,Negative Bias Stress)和负偏压光照应力(NBIS,Negative Bias Illumination Stress)测定确认制作透明且柔韧的氮-掺杂石墨烯晶体管的制备例3的元件稳定性(参照图10)。根据NBS测定结果,制备例3呈现即使经过3600秒钟之后,测定值仍然不变的非常稳定的元件特性,将照明(Illumination)设定为1500lux的NBIS测定中也呈现非常稳定的元件特性。这是与被报告为非常稳定的ZnO N-F(氧化物半导体,ACS应用材料与界面(Applied Materials&Interfaces),2017,9,24688)相似的稳定性,是非常优秀的特性。

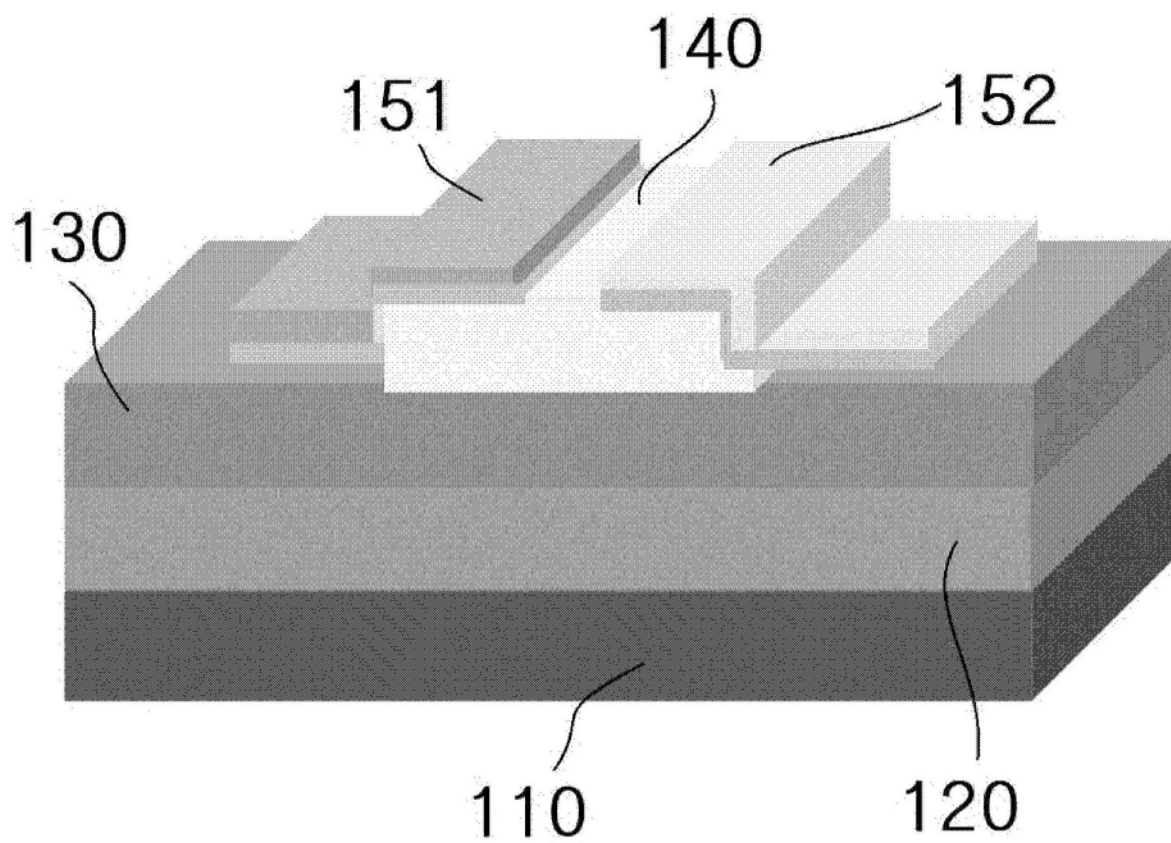


图1

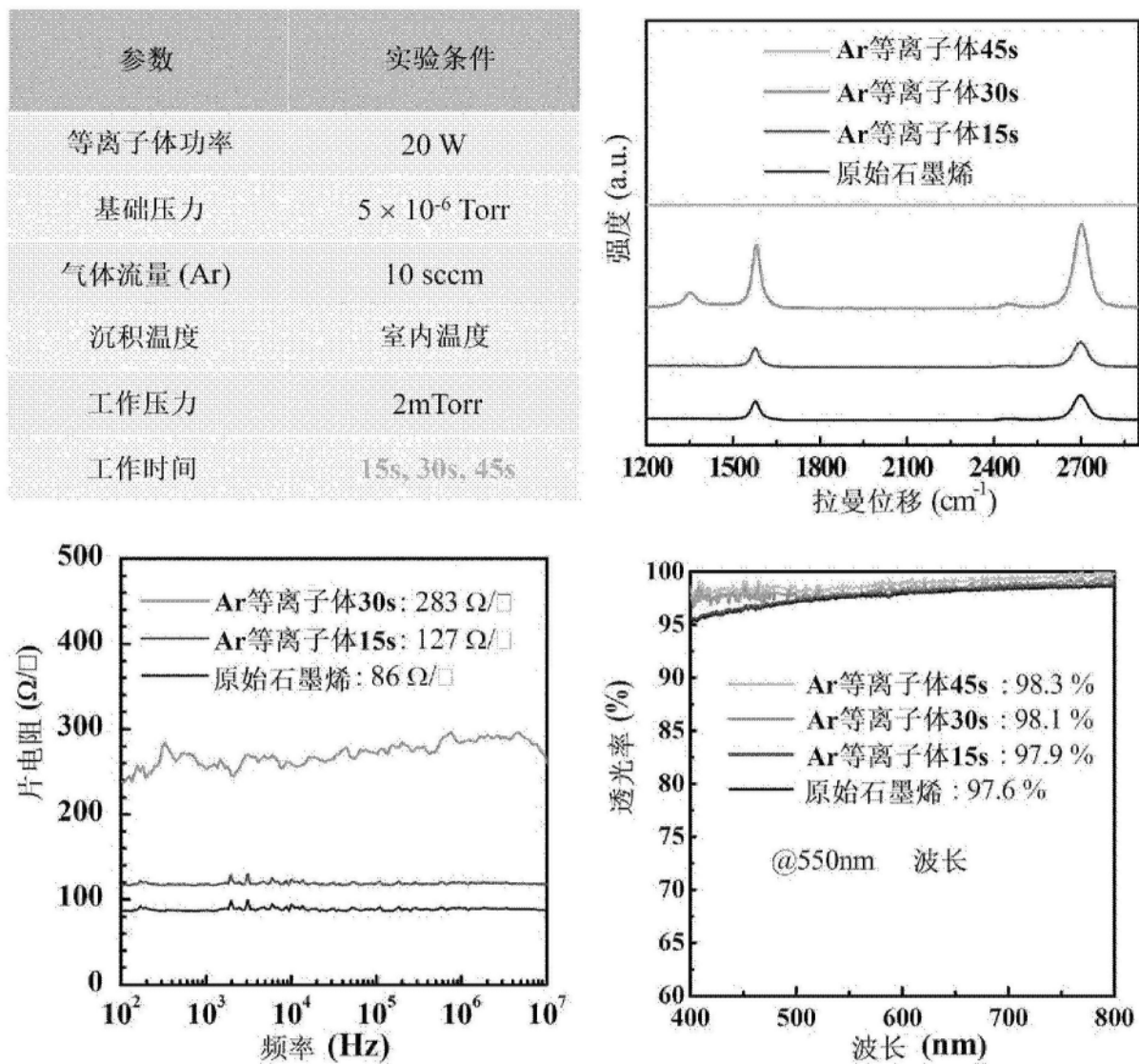


图2

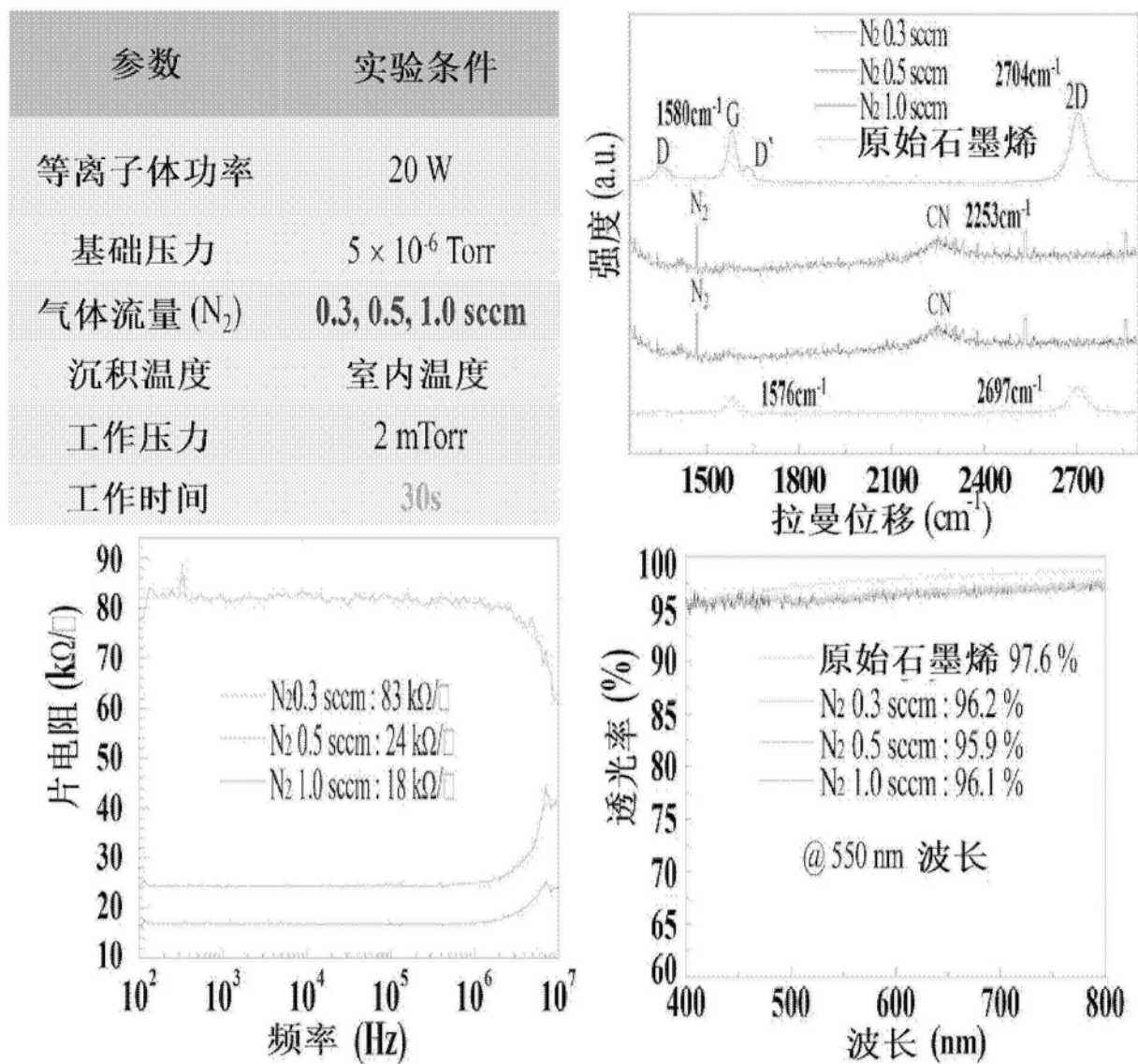


图3

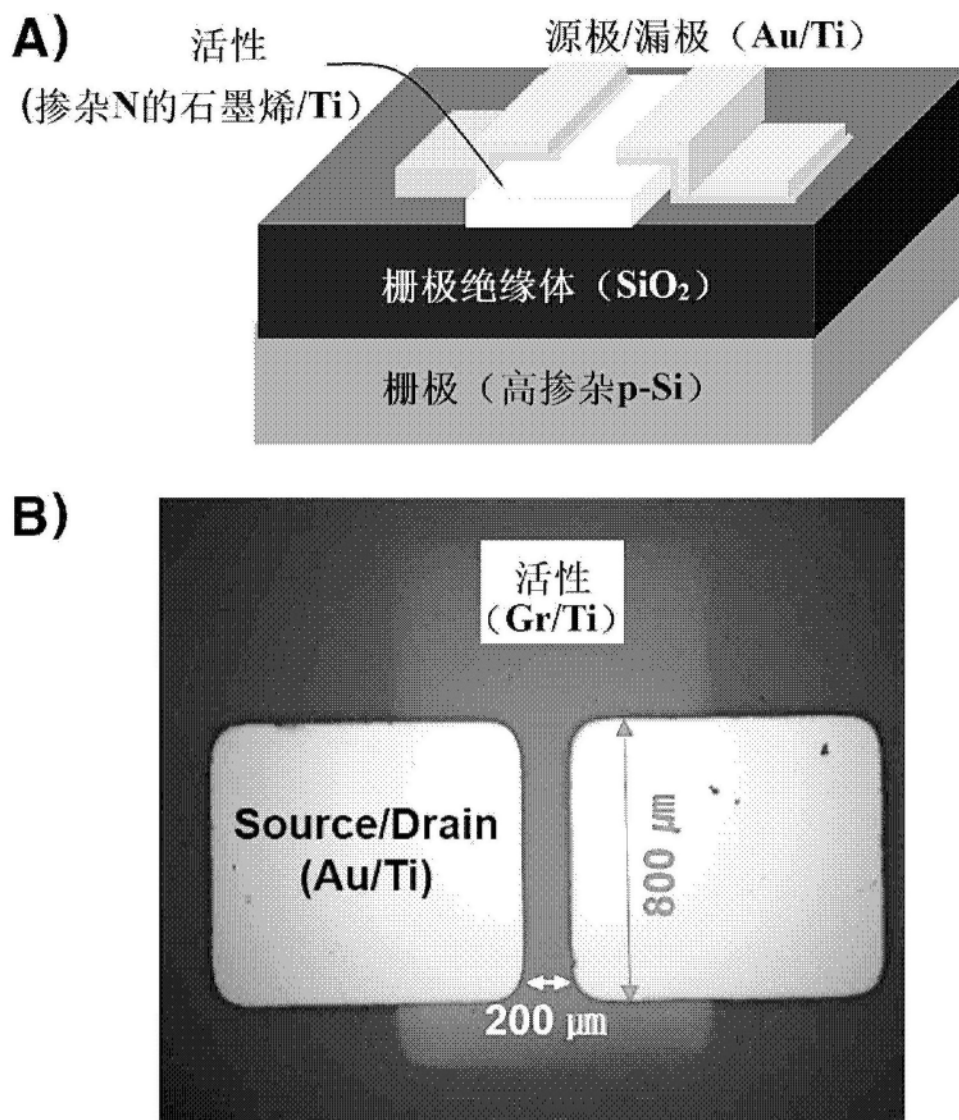


图4

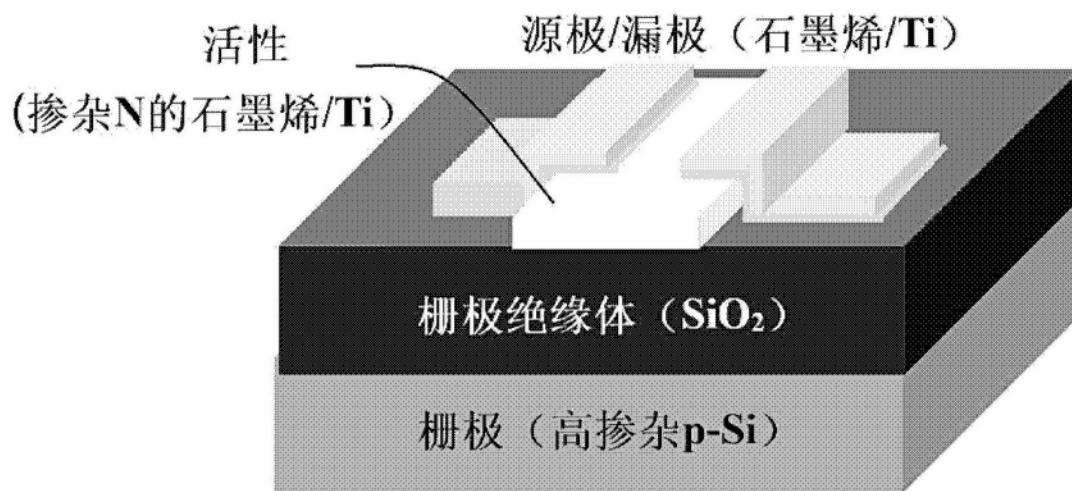


图5

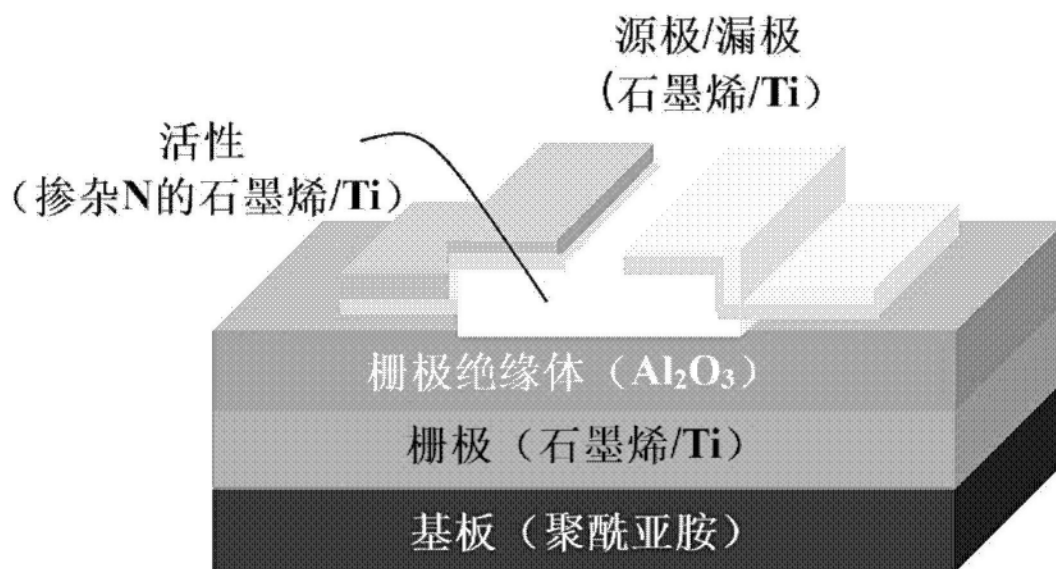


图6

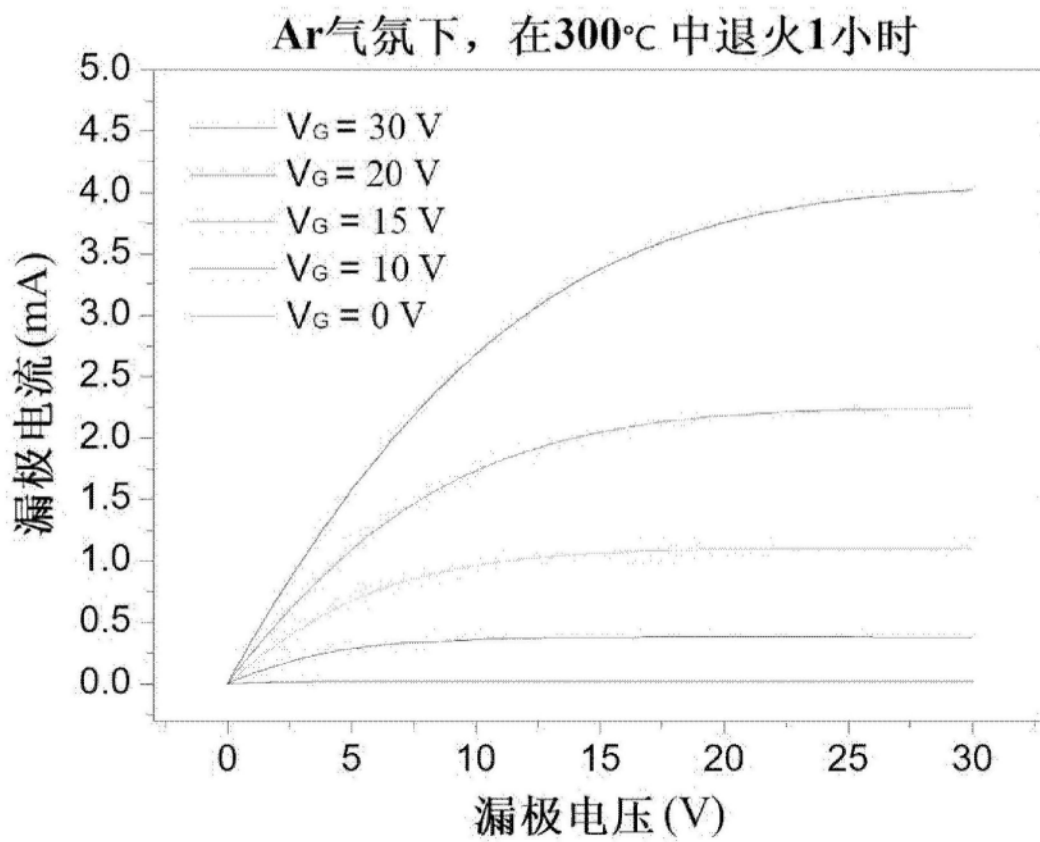
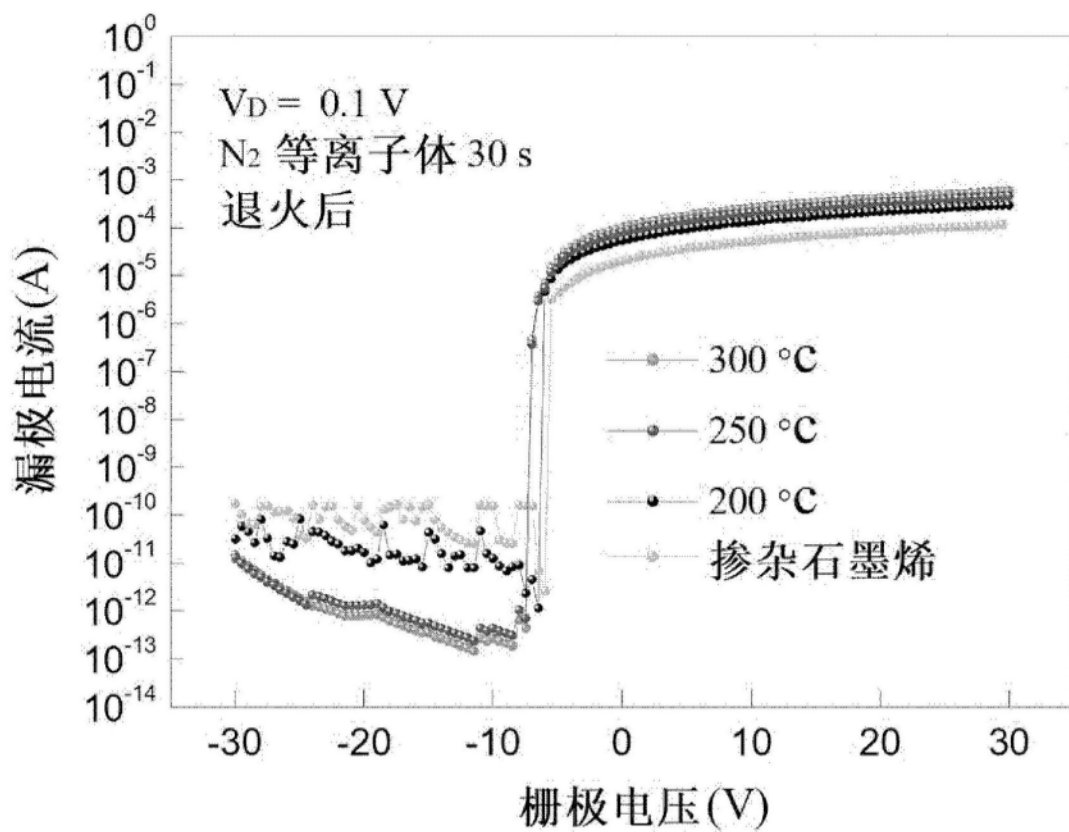


图7

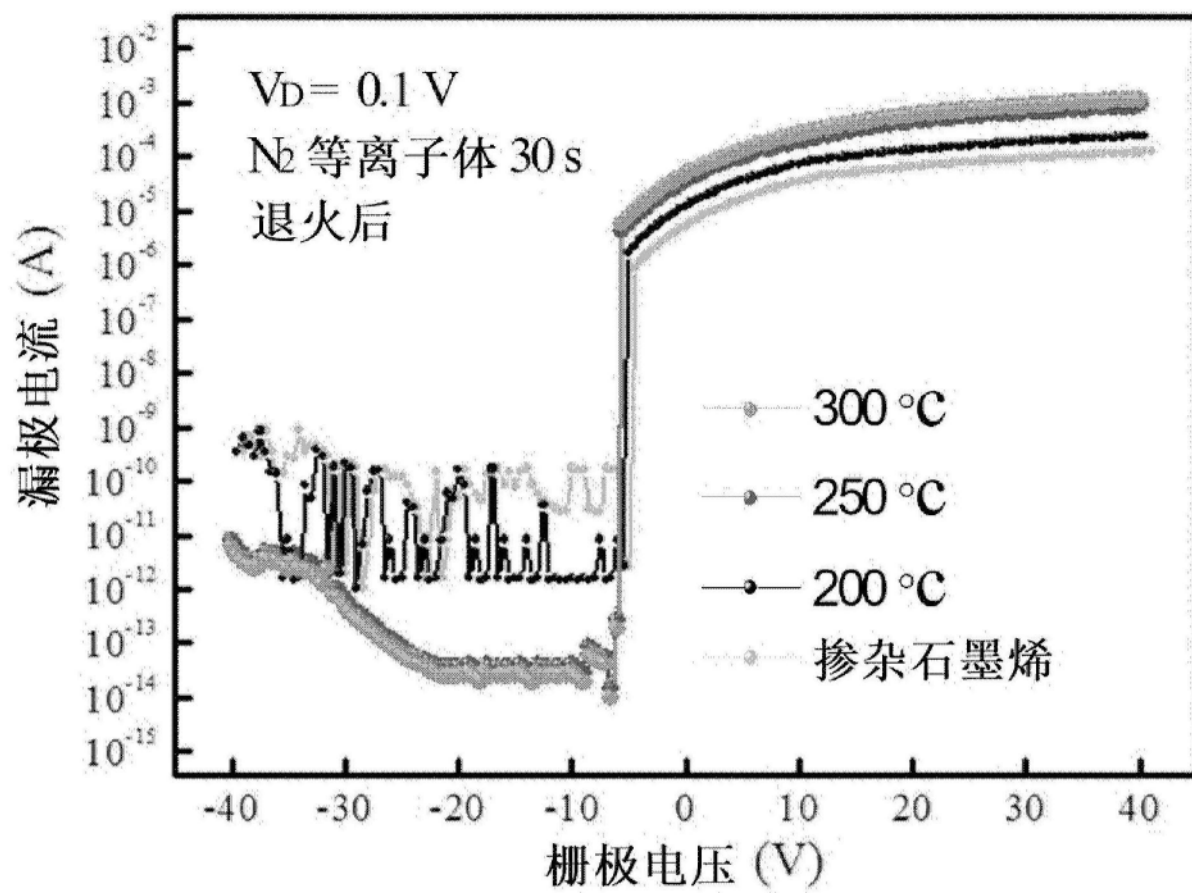


图8

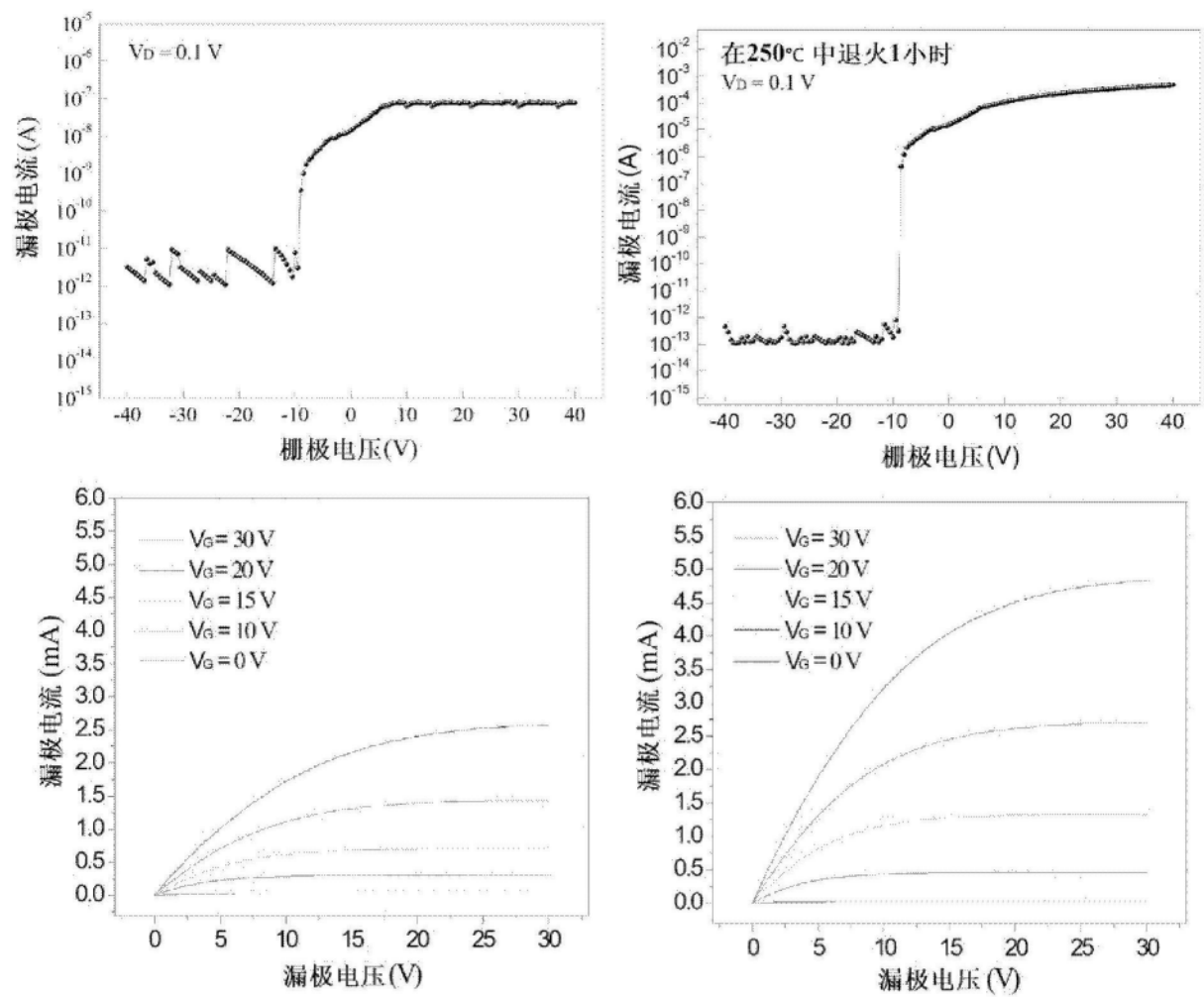


图9

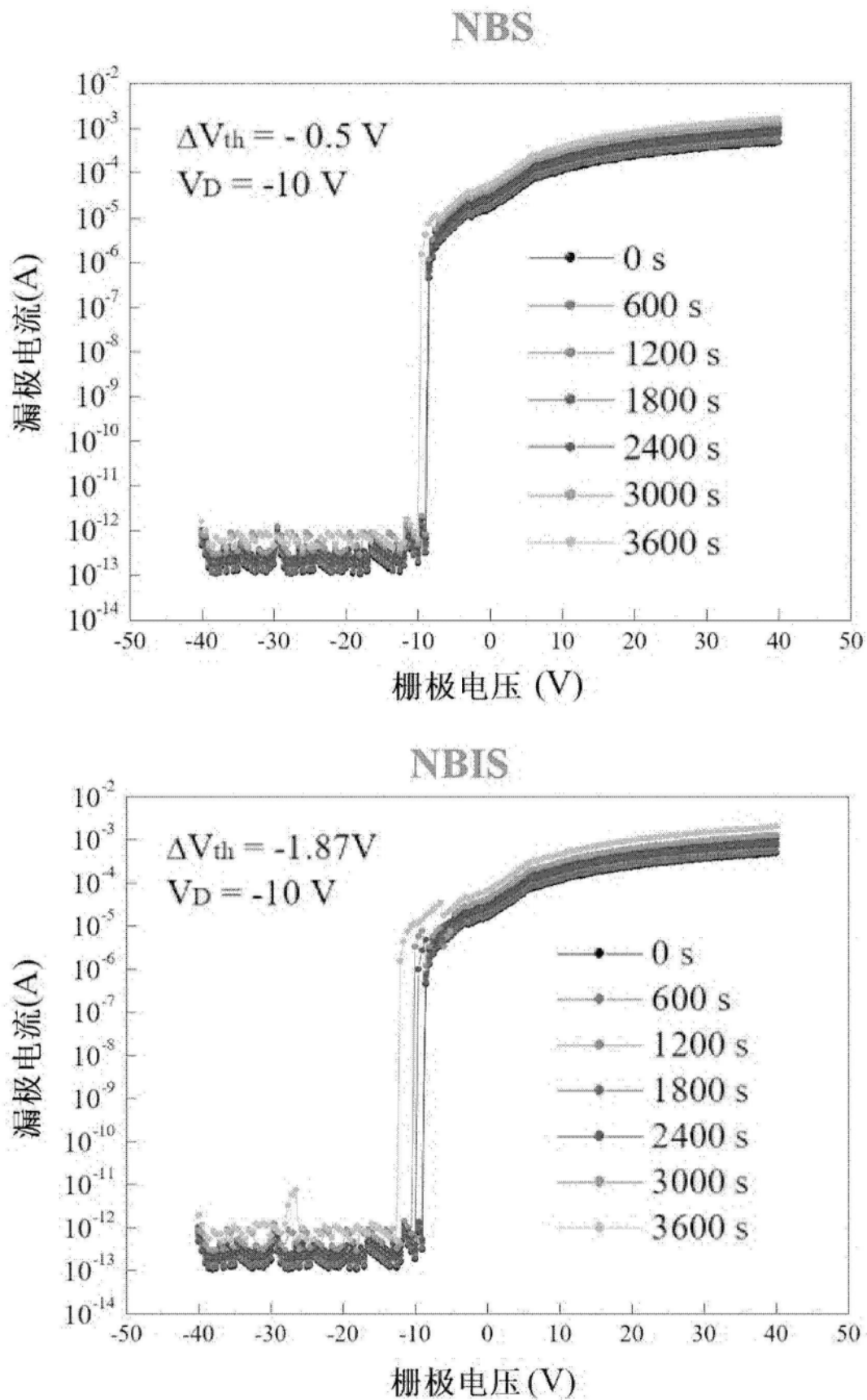


图10