

# h-BN/diamond 异质结的制备与 沟道载流子输运性质\*

贾燕伟<sup>1)</sup> 何健<sup>1)</sup> 何萌<sup>1)</sup> 朱肖华<sup>1)</sup> 赵上熳<sup>1)</sup>  
刘金龙<sup>1)2)†</sup> 陈良贤<sup>1)</sup> 魏俊俊<sup>1)2)</sup> 李成明<sup>1)2)‡</sup>

1) (北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083)

2) (北京科技大学顺德研究生院, 佛山 528300)

(2022 年 5 月 19 日收到; 2022 年 7 月 11 日收到修改稿)

基于 h-BN 钝化的氢终端金刚石表面导电沟道表现出高的空穴迁移率, 但是当前 h-BN 钝化金刚石主要采用机械剥离的方法, 无法实现大尺寸导电沟道, 难以满足实际的应用要求. 本文系统地开展了经典转移 h-BN 对氢终端金刚石表面导电沟道的载流子输运影响研究. 通过微波化学气相沉积外延生长高质量单晶金刚石, 并通过表面氢化处理得到氢终端金刚石. 通过湿法转移不同层数 h-BN 制备出 h-BN/H-diamond 异质结, 系统地研究了沟道载流子输运特征. 研究表明, h-BN 转移后沟道导电性能明显增强, 且随着 h-BN 厚度的增加, 沟道导电性增强效果趋于稳定. 多层 h-BN 的转移可使氢终端金刚石表面载流子密度提升近 2 倍, 方阻降低到之前的 50%. 当前的结果显示 h-BN/H-diamond 异质结可能存在转移掺杂效果, 使得载流子密度显著提升. 伴随载流子密度的增加, h-BN 钝化的金刚石表面沟道迁移率保持稳定, h-BN 在金刚石表面吸附, 使得原本在氢终端表面的负电荷向 h-BN 表面移动, 作用距离加大, 减弱了氢终端金刚石导电沟道中空穴和介质层负电荷的耦合作用, 使其迁移率保持稳定.

**关键词:** 氢终端金刚石, 异质结, 六方氮化硼, 湿法转移

**PACS:** 81.05.Cy, 81.05.ug, 78.30.Am, 73.25.+i

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220995

## 1 引言

金刚石由于具有宽禁带、高击穿电压、高导热率和高载流子迁移率等优异性能使之成为高频大功率电子器件最有潜力的半导体材料. 目前获得金刚石半导体主要采用掺杂和表面氢化处理两种方法<sup>[1]</sup>. 金刚石掺杂由于容易造成晶格畸变等诸多原因限制了其在电子学领域的应用, 而氢终端金刚石自发现以来表现出相对于掺杂较好的导电性能成为当

下的研究热点<sup>[2,3]</sup>.

目前, 对于氢终端金刚石的导电原理, 越来越多的研究结果支持转移掺杂理论, 即氢终端金刚石表面呈现负的电子亲和势, 当表面吸附特定化学势的物质如大气, 会使氢终端金刚石亚表面形成二维空穴气. 随后研究人员也发现除了氢终端金刚石在空气中有转移掺杂的效果外, 其他气体吸附物以及固体介质也具有类似效果, 如  $\text{NO}_2$ <sup>[4-6]</sup>,  $\text{O}_3$ <sup>[7]</sup> 或一些固体介质材料  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ <sup>[8,9]</sup>,  $\text{WO}_3$ <sup>[10-13]</sup>,  $\text{ReO}_2$ <sup>[13]</sup>,  $\text{V}_2\text{O}_5$ <sup>[14]</sup>,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[15,16]</sup>,  $\text{MoO}_3$ <sup>[17]</sup> 和  $\text{AlN}$ <sup>[18]</sup> 等. 这些固

\* 国家磁约束核聚变发展研究专项资助 (批准号: 2019YFE03100200)、北京自然科学基金 (批准号: 4192038) 和核探测与核电子学国家重点实验室项目 (SKLPDE-KF-202202).

† 通信作者. E-mail: liujinlong@ustb.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

体材料介质不仅具有转移掺杂的效果,大大地提高其导电性能,同时显著地改善了导电沟道的稳定性.这主要是由于固体介质具有更高的电子亲和势和功函数,在氢终端金刚石表面转移掺杂时产生更多的电荷聚集,沟道载流子密度增多,实现导电性能的提高.

然而氢终端金刚石由于表面终端键长限制,使得转移掺杂偶极矩较小,增大了沟道载流子输运散射,因此迁移率通常较低.近年来,先后报道通过外延高质量金刚石层<sup>[19]</sup>、不定形碳吸附<sup>[20]</sup>等方法实现了氢终端金刚石表面导电沟道载流子迁移率的增强.基于二维材料钝化氢终端金刚石表面同样可以提升沟道载流子迁移率,主要由于二维材料可以钝化氢终端金刚石表面态,同时部分电荷可以在二维材料外表面转移,增加电荷作用距离,减小表面散射,从而显著地提升载流子迁移率.如 Sasama 等<sup>[21]</sup>通过剥离得到高质量薄层 h-BN,制备了单晶 h-BN 作为钝化栅极的金刚石场效应晶体管,器件迁移率为  $300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .随后又制备了由氢终端金刚石导电沟道和六方氮化硼 (h-BN) 栅绝缘层钝化的一种空穴迁移率为  $680 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  宽带隙晶体管<sup>[22]</sup>.然后基于剥离技术实现的 h-BN 与金刚石异质结受制于尺寸,无法实现大面积制备.相比之下,二维材料的转移过程可以实现大尺寸的 h-BN 与金刚石异质结,更具有应用前景.

本研究采用湿法转移将不同厚度的 h-BN 转移到氢终端金刚石表面,对比了转移前后氢终端金刚石表面导电性质,探究了 h-BN/氢终端金刚石异质结的载流子输运特征,结合理论分析了其转移掺杂的机制.

## 2 实 验

### 2.1 金刚石外延生长与表面氢化处理

为了获得高迁移率的氢终端金刚石导电沟道,生长高质量单晶金刚石层十分重要.实验采用  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的 Ib 型 (100) 单晶金刚石籽晶,在

实验室自主设计的穹顶式微波等离子体化学气相沉积 (microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD) 设备 (6 kW, 2.45 GHz) 上进行高质量层外延生长,具体生长流程参考已发表文献<sup>[23,24]</sup>.将金刚石外延层进行机械抛光获得粗糙度低于 1 nm 的表面,然后将金刚石放入  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  (体积比为 3:1) 酸溶液加热煮沸 45 min.取出后使用去离子水、丙酮、酒精依次清洗,用无尘布擦干放入样品盒中准备好.然后将钼托放入微波腔室中进行氢化预处理,氢化预处理是为了将腔室以及钼托上附着的污染物通过氢等离子体刻蚀并随氢气气流排出腔室.最后将样品放入腔室内,通过调节功率、腔压和钼托的散热速率来控制氢化温度.利用红外测温仪对样品温度进行实时测量,最终得到氢终端金刚石.具体各阶段工艺参数如表 1 所列.

### 2.2 h-BN 的转移

将市售的铜衬底单层、少层 (小于 5 nm)、多层 (大于 5 nm) 的 h-BN 通过湿法转移到氢终端金刚石表面,并对比不同厚度对氢终端金刚石表面电学性能的影响规律.具体转移过程如下:首先在铜箔基底的 h-BN 薄膜表面旋涂一层 PMMA 溶液,并将 PMMA/h-BN/Cu 叠层样品放置在  $150^\circ\text{C}$  的恒温加热台上加热 15 min,使得 PMMA 溶液发生玻璃化转变而固化.然后,将 PMMA/h-BN/Cu 样品悬浮放置于稀释 10 倍摩尔浓度为  $0.5\text{--}0.7 \text{ mol/L}$  的  $\text{FeCl}_3$  溶液中,以腐蚀铜箔基底,待铜箔基底腐蚀完全后,将 PMMA/h-BN 转移至金刚石衬底上,并将 PMMA/h-BN/金刚石样品置于丙酮溶液中直至 PMMA 完全去除.最后,分别用无水乙醇和去离子水将 h-BN/金刚石样品清洗干净并在室温下自然晾干.

分别采用激光拉曼光谱表征金刚石衬底与外延层的晶体质量,采用 X 射线摇摆曲线表征其结晶质量,采用光致发光谱 (photoluminescence, PL) 表征其杂质信息.采用 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 检测了 h-BN/

表 1 生长、氢化预处理、表面氢化工艺参数  
Table 1. Growth, cleaning, and hydrogenation parameters.

工艺参数	温度/ $^\circ\text{C}$	功率/W	腔压/kPa	甲烷流量/%	氧气流量/%
生长	800—850	3800—3900	17—20	5	0.3
氢化预处理	800	1500—2000	10—12	—	—
表面氢化	700—750	1400—1600	3—5	—	—

H-diamond 异质结表面元素信息、利用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 检测转移 h-BN 厚度信息, 采用 TEM(JEM-2100) 观察转移之后的界面结构, 使用霍尔效应测量 (HMS3000) 常温下氢终端金刚石电学性能。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 氢终端金刚石表面电学性能表征

##### 1) 高质量外延层的表征

图 1(a) 和图 1(b) 分别为生长前金刚石衬底和生长后金刚石外延层的拉曼光谱图, 可以明显看到位于  $1332\text{ cm}^{-1}$  的金刚石拉曼特征峰。对衬底和生长后的金刚石拉曼图谱去除背底后进行洛伦兹拟合得到生长前、后金刚石拉曼峰的半峰宽分别为  $6.04\text{ cm}^{-1}$  和  $5.95\text{ cm}^{-1}$ 。对生长前金刚石衬底和生长后金刚石外延层 (400) 晶面进行摇摆测试, 结果如图 1(c) 和图 1(d) 所示。生长前后金刚石特征峰半高宽分别为  $0.027^\circ$  和  $0.013^\circ$ 。金刚石衬底与生长后外延层的 PL 光谱如图 1(e) 和图 1(f) 所示。金刚石衬底显示出强的  $572\text{ nm}$  发光峰和较弱的  $613\text{ nm}$  发光峰, 分别对应金刚石本征发光峰和 Ni 相关的缺陷发光峰<sup>[25]</sup>。而外延生长后, 仅呈现金

刚石本征发光峰, 未见到化学气相沉积过程中常见的氮杂质相关峰。综合来看, 金刚石生长后拉曼以及摇摆曲线半峰宽均比生长前小, 且外延层未显示有明显的氮杂质, 表明金刚石经过高质量外延结晶质量显著提高。

##### 2) 表面氢化处理结果表征

氢等离子体处理前后的金刚石表面 AFM 测试结果分别如图 2 所示。MPCVD 外延生长的高质量单晶金刚石抛光后具有纳米尺度划痕形貌, 分析得到表面粗糙度为  $0.905\text{ nm}$ 。整体表面轮廓起伏低于  $3.4\text{ nm}$ 。由于 p 型沟道通常出现在氢终端金刚石表面下约  $10\text{ nm}$  处, 因此抛光后的金刚石表面粗糙度满足制备氢终端金刚石表面高载流子迁移率沟道的必要条件。对样品进行表面氢化处理后形貌显示, 氢化处理并未刻蚀掉抛光留下的痕迹。氢化处理后表面粗糙度降为  $0.698\text{ nm}$ , 说明金刚石表面尖锐的区域被刻蚀从而变得平缓。这与文献中得到的结果相似<sup>[26]</sup>, 即低功率密度下等离子体优先刻蚀金刚石尖锐部分, 进而使得到的氢终端金刚石粗糙度降低。

为了评估氢终端金刚石样品在大气中的导电性能, 将经过氢化处理后的样品暴露在大气中。样品从腔室内拿出的  $12\text{ h}$  内, 每隔一个小时进行

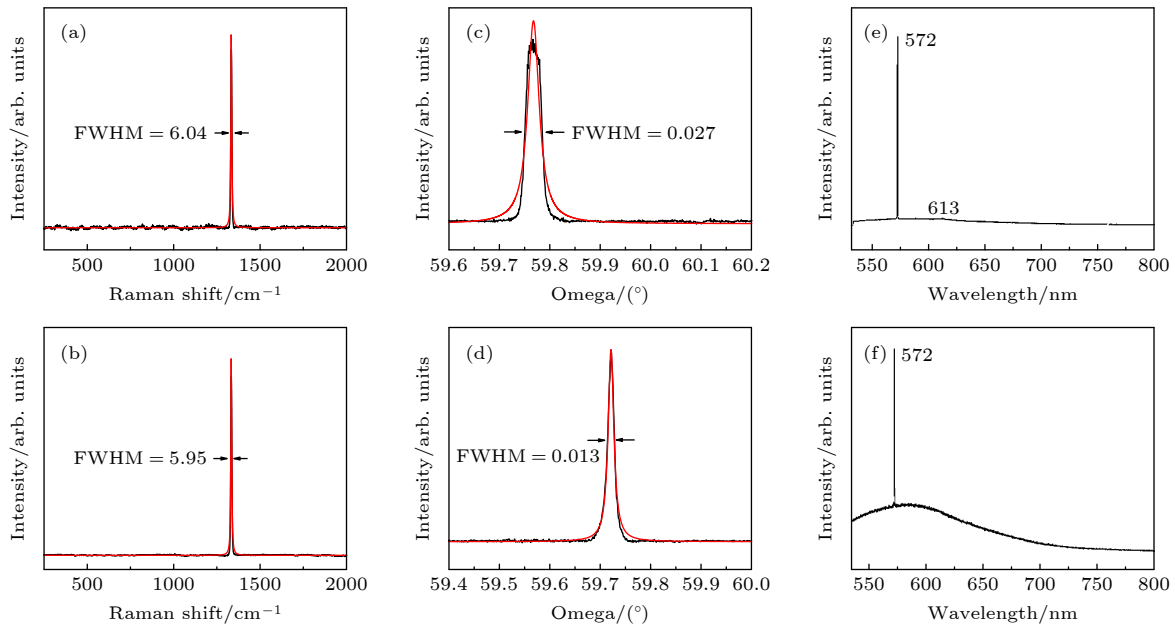


图 1 (a) 生长前衬底拉曼光谱图; (b) 生长后外延层拉曼光谱图; (c) 生长前衬底摇摆曲线; (d) 生长后外延层摇摆曲线; (e) 生长前衬底 PL 光谱; (f) 生长后外延层 PL 光谱

Fig. 1. (a) Raman spectra of the substrate before growth; (b) Raman spectra of the epitaxial layer after growth; (c) rocking curve of pre-growth substrate; (d) rocking curve of post-growth epitaxial layer; (e) PL spectra of pre-growth substrate; (f) PL spectra of post-growth epitaxial layer.

一次测量, 12—50 h 内每隔 24 h 测量, 得到氢终端金刚石电学性能随时间变化结果如图 3 所示. 从腔室刚取出与空气开始接触, 氢终端金刚石便建立导电性, 随着时间推移, 方阻、迁移率逐渐降低, 载流子密度逐渐增大; 直至 5—6 h 电学性能稳定下来. Geis 等 [27] 报道了类似的研究结果, 氢终端金刚石在第一天方阻性能下降, 这是由于氢终端金刚石导电沟道的形成过程中吸附空气中的离子进行转移掺杂, 在氢终端金刚石中产生二维空穴气, 随着时间推移, 载流子密度逐渐增大, 方阻、迁移率

逐渐降低, 最终建立稳定的导电沟道.

### 3.2 h-BN 转移前后氢终端金刚石电学性能的演变

由于 h-BN 的拉曼峰 ( $1366\text{ cm}^{-1}$ ) 与金刚石 ( $1332\text{ cm}^{-1}$ ) 拉曼峰较为接近, h-BN 的峰信号容易受到掩盖. 因此将 h-BN 转移硅片上, 对 h-BN/Si 进行拉曼光谱分析确认 h-BN 转移是否成功, 结果如图 4 所示. 从图 4 中可以看到, h-BN 转移后硅片上存在 h-BN 左移后  $1360\text{ cm}^{-1}$  的特征峰, 以及

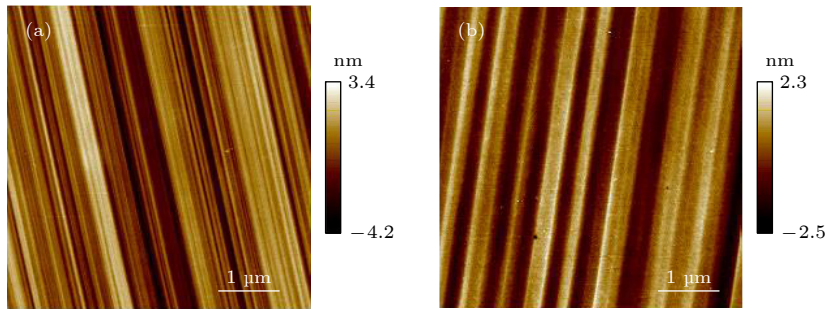


图 2 (a) 表面氢化处理前金刚石精密抛光表面形貌; (b) 金刚石氢化处理后表面形貌

Fig. 2. (a) Surface morphology of precision-polishing diamond before surface hydrogenation; (b) surface morphology of diamond after hydrogenation treatment.

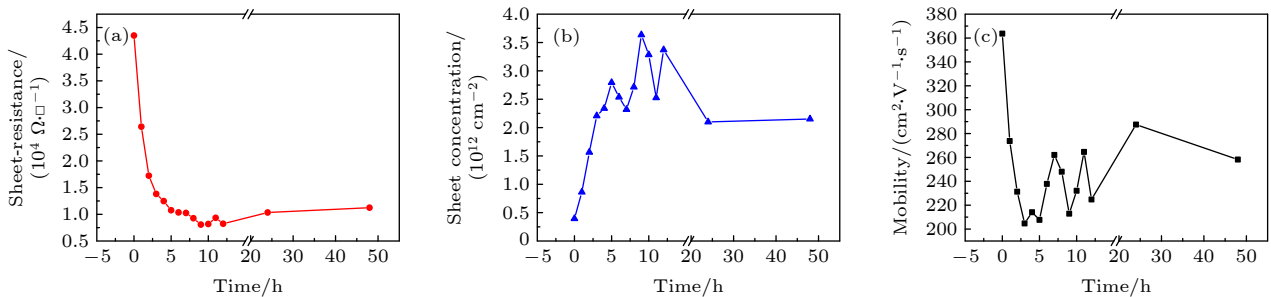


图 3 氢终端金刚石导电性能随时间的变化 (a) 方阻随时间的变化; (b) 载流子密度随时间变化; (c) 迁移率随时间变化

Fig. 3. The conductivity of hydrogen terminated diamond changes over time: (a) The change of the square resistance over time; (b) carrier concentration over time; (c) mobility over time.

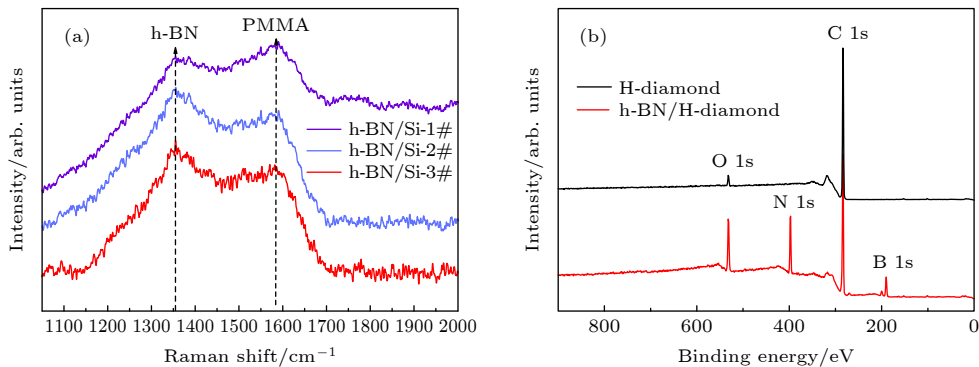


图 4 (a) h-BN/Si 拉曼图谱; (b) 转移前后氢终端表面的 XPS

Fig. 4. (a) Raman spectra of h-BN/Si; (b) XPS of the hydrogen terminated surface before and after h-BN transfer.



未完全去除的 PMMA( $1580\text{ cm}^{-1}$ ) 的特征峰<sup>[28]</sup>. 采用相同的工艺将 h-BN 转移到氢终端金刚石上. 对转移前后的氢终端金刚石表面进行 XPS 以及拉曼光谱分析, 可以看到在转移之后氢终端金刚石表面 N ( $398.1\text{ eV}$ ) 元素以及 B( $190.6\text{ eV}$ ) 元素的存在. 从 XPS 以及拉曼测试结果可以确定, h-BN 已经成功转移到氢终端金刚石表面. 进而对 h-BN/H-diamond 电学性能进行测量得到结果如表 2 所列. 当金刚石表面氢化处理暴露空气中一定时间后, 其电学性能得以稳定, 稳定后的 (100) 氢终端金刚石的电学性能如下表 2 所列. 其中转移前电学性能为空气中转移掺杂金刚石的电学性能. 可以看到氢终端金刚石迁移率高达  $150\text{--}250\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 方阻为  $10000\text{ }\Omega/\square$  左右. 为消除 PMMA 的影响, 将 PMMA 转移到氢终端金刚石上采用相同工艺处理, 得到表 2 中 YW-0 数据. 可以看到转移前后电学性能无明显变化, 说明 PMMA 残胶在本研究工作中无导电增强的效果. 可以发现转移多层 h-BN 后氢终端金刚石的电学性能明显增强. 其中载流子密度提升 2 倍左右, 方阻降低到之前的 50%, 迁移率没有降低.

表 2 多层 h-BN 转移前后 (100) 氢终端金刚石的电学性能 (YW-0 为 PMMA 空白对照试验; YW-1, YW-2, YW-3 为多层 h-BN 转移前后的结果)

Table 2. Electrical properties of hydrogen terminated diamond before and after multilayer h-BN transfer (YW-0 is a PMMA blank control test; YW-1, YW-2, YW-3 are multilayer Results before and after h-BN transfer).

编号		方阻 $/(10^3\text{ }\Omega\cdot\square^{-1})$	迁移率 $/(10^2\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	载流子密度 $/(10^{12}\text{ cm}^{-2})$
YW-0	转移前	10.8	203.9	2.84
	转移后	10.6	198.5	2.96
YW-1	转移前	12.0	246.6	2.11
	转移后	5.98	248.4	4.20
YW-2	转移前	10.1	246.0	2.50
	转移后	5.48	195.6	5.83
YW-3	转移前	10.2	161.9	3.75
	转移后	4.88	145.1	8.81

氢终端金刚石表面转移不同厚度 h-BN 后的电学性能如图 5 所示. 转移 h-BN 之后氢终端金刚石的电学性能位于图像的右上方, 说明转移之后氢终端金刚石的载流子密度、方阻、迁移率性能均有提升. 并且多层的转移性能更加稳定, 少层、单层虽有提升但并未有多层规律稳定. 随着层数的增

加, 电学性能的提升也更加稳定<sup>[29]</sup>. 这是由于在湿法转移过程中, 单层、少层 h-BN 在转移过程中易于破裂, 所以电学性能的增强效果不稳定. 而多层 h-BN 展现出稳定的电学性能增强效果, 在湿法转移过程中表现出很好的可重复性. 载流子密度提升近一倍, 方阻降低到之前的 50%. 伴随沟道载流子密度增加的同时, h-BN 钝化的金刚石表面沟道迁移率保持稳定, 这与过渡金属氧化物转移掺杂表现的载流子输运特征不同. 典型的氢终端金刚石导电沟道转移掺杂效应通常呈现出载流子密度增强的同时迁移率大幅降低. 而在本研究工作中 h-BN 对氢终端金刚石载流子密度提升的同时保证了其迁移率基本没有下降, 从而使得导电性能的提升.

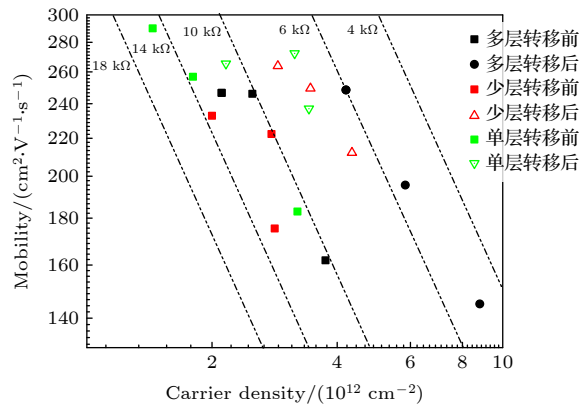


图 5 不同厚度的 h-BN 转移后氢终端金刚石电学性能  
Fig. 5. Electrical properties of hydrogen terminated diamond after different-thickness h-BN transfer.

### 3.3 h-BN/H-diamond 异质结导电增强机制的分析

对转移法制备的 h-BN/H-diamond 异质结导电机理进行分析. 图 6 为氢终端金刚石和不同固体介质材料的电子亲和势, 可以看到氢终端金刚石负的电子亲和势 ( $-1.3\text{--}1.6\text{ eV}$ )<sup>[30]</sup>, h-BN 具有高于氢终端金刚石的电子亲和势 ( $-0.1\text{ eV}$ )<sup>[31]</sup>, 这使得氢终端金刚石的电子同样可能转移到 h-BN 层, 起到转移掺杂的效果. Mirabedini 等<sup>[32]</sup>对 h-BN/H-diamond 异质结进行理论模拟计算研究发现 h-BN 与氢终端金刚石界面存在电子转移的效果. 与这些材料相比, h-BN 虽然没有更高的电子亲和势, 但根据实验结果表明, h-BN 在氢终端金刚石上起到一定的转移掺杂效果. 如图 7(a) 和图 7(b) 分别为本实验制备多层 h-BN/H-diamond 异质结界面结构的 TEM 图和金刚石结构图, 理论上

h-BN(0001) 面晶面间距为  $3.3 \text{ \AA}$ <sup>[33]</sup>, 通过测量其晶面间距得到 h-BN(0001) 面晶面间距为  $3.37 \text{ \AA}$ , 进一步确定本研究成功的制备了 h-BN/H-diamond 异质结. 同时可以看出 h-BN 与氢终端金刚石形成很好的接触, 这有利于氢终端金刚石表面的电子向 h-BN 层转移. 同时发现 h-BN/H-diamond 并非完美的界面, 界面存在部分的非晶 PMMA 残留, 在转移法中很常见. 目前有关残留 PMMA 对沟道载流子密度的影响规律仍不明确.

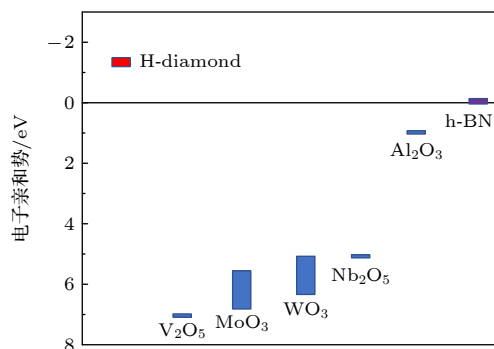


图 6 氢终端金刚石以及不同固体介质材料的电子亲和势  
Fig. 6. Schematic diagram of hydrogen terminated diamond and metal oxide.

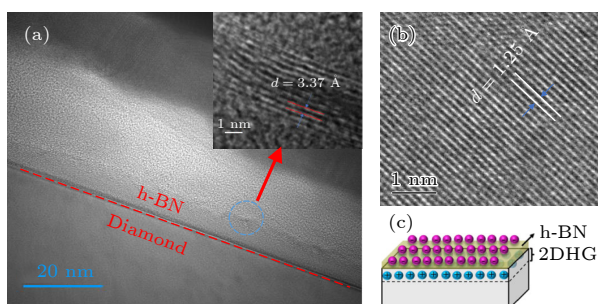


图 7 (a) h-BN/H-diamond 的界面结构; (b) diamond 晶体结构; (c) h-BN/H-diamond 异质结示意图  
Fig. 7. (a) Interface structure of h-BN/H-diamond; (b) diamond crystal structure; (c) schematic diagram of h-BN/H-diamond heterojunction.

对沟道中载流子迁移率的变化规律进行分析. 从图 5 中可以看出, 氢终端金刚石表面沟道的迁移率均随着载流子密度的升高而降低, 这符合典型的二维空穴气的导电特征. 通常, 影响氢终端金刚石表面迁移率的两个主要因素为表面 (界面) 粗糙度散射 (SFR/IFR) 和表面散射<sup>[34]</sup>. 在本研究中, 金刚石粗糙度经抛光后粗糙度均低于  $1 \text{ nm}$ , 所以影响氢终端金刚石迁移率的另一因素为表面杂质散射. Li 等<sup>[35]</sup> 研究发现, 氢终端金刚石表面形成的

离子层或介质层与氢终端金刚石下表面的空穴之间存在库仑耦合的作用, 即氢终端金刚石中的空穴的迁移率受到表面的负电荷的束缚. h-BN 理论上具有较好的二维结构, 没有悬挂键. 当 h-BN 转移到氢终端金刚石表面时, 一方面 h-BN 起到一定的转移掺杂效果, 另一方面负电荷离子层与氢终端金刚石表面分隔开, 减弱了离子层对氢终端金刚石空穴的束缚, 因此具有迁移率提升的效果, 如图 7(c) 所示. Sasama 等<sup>[21]</sup> 和 Yosuke 等<sup>[22]</sup> 通过采用剥离法得到质量更高的 h-BN, 制备的场效应晶体管减弱了离子层与空穴之间的库仑耦合作用, 得到了更高的迁移率. 本研究采用湿法转移工艺制备得到的 h-BN/H-diamond 具有迁移率稳定, 同时载流子密度升高时由于内部空穴的库伦散射使得样品本身迁移率降低, 因此制备得到的样品载流子密度升高, 致使迁移率下降的部分与减弱库仑耦合作用使迁移率提升的效果相互抵消, 使得迁移率维持基本不变.

## 4 结 论

本研究通过 MPCVD 法外延 (100) 单晶金刚石, 并通过表面氢化处理得到氢终端金刚石. 制备得到的氢终端金刚石在接触空气 5—7 h 完成转移掺杂得到电学性能稳定的氢终端金刚石. 通过湿法转移 h-BN 确定制备出 h-BN/H-diamond 异质结. 通过对比研究转移前后的导电性能, 发现氢终端金刚石的电学性能在转移之后明显增强. 且随着厚度的增加转移掺杂的效果越稳定, 其中多层 h-BN 的转移可使氢终端金刚石载流子密度提升 2 倍左右, 方阻降低到之前的 50%, 迁移率并无明显的降低, 表现出较好的可重复性. 理论分析表明, h-BN/H-diamond 异质结存在转移掺杂的效果, 并在一定程度上减弱了氢终端金刚石空穴和介质层负电荷的耦合作用, 保持其迁移率基本不变.

## 参考文献

- [1] Stenger I, Pinault Thauray M A, Kociniowski T, Lusson A, Chikoidze E, Jomard F, Dumont Y, Chevallier J, Barjon J 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 073711
- [2] Li C M, Ren F T, Shao S W, Mou L X, Zhang Q R, He J, Zheng Y T, Liu J L, Wei J J, Chen L X, Lü F X 2022 *J. Synth. Cryst.* **51** 759 (in Chinese) [李成明, 任飞桐, 邵思武, 牟恋希, 张钦睿, 何健, 郑宇亭, 刘金龙, 魏俊俊, 陈良贤, 吕反修 2022 *人工晶体学报* **51** 759]

- [3] Jiang R C, Li C Q, Liu G C, Zhou X D 2008 *Diamond Abras. Eng.* **20** 42 (in Chinese) [姜荣超, 雷雨, 李超群, 刘谷成, 周晓丹 2008 金刚石与磨料磨具工程 **20** 42]
- [4] Kubovic M, Kasu M, Kageshima H, Maeda F 2010 *Diamond Relat. Mater.* **19** 889
- [5] Geis M W, Fedynyshyn T H, Plaut M E, Wade T C, Wuorio C H, Vitale S A, Varghese J O, Grotjohn T A, Nemanich R J, Hollis M A 2018 *Diamond Relat. Mater.* **84** 86
- [6] Saha N C, Takahashi K, Imamura M, Kasu M 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 135702
- [7] Sato H, Kasu M 2012 *Diamond Relat. Mater.* **24** 99
- [8] Daicho A, Saito T, Kurihara S, Hiraiwa A, Kawarada H 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 223711
- [9] Geis M W, Varghese J O, Hollis M A, Nemanich R J, Zhang X, Turner G W, Warnock S M, Vitale S A, Osadchy T, Zhang B 2020 *Diamond Relat. Mater.* **106** 107819
- [10] Russell S A O, Cao L, Qi D, Tallaire A, Crawford K G, Wee A T S, Moran D A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 202112
- [11] Tordjman M, Saguy C, Bolker A, Kalish R 2014 *Adv. Mater.* **1** 1300155
- [12] Verona C, Ciccognani W, Colangeli S, Limiti E, Marco Marinelli G, Verona R 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 025104
- [13] Tordjman M, Weinfeld K, Kalish R 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 111601
- [14] Kevin G, Crawford, Liang C, Dongchen Q, Alexandre T, Limiti E, Verona C, Andrew T S W, David A J M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 042103
- [15] Hussain J, Abbasi H N, Wang W, Wang Y F, Wang H X 2020 *AIP Adv.* **10** 035327
- [16] Xing Y F, Ren Z Y, Zhang J F, Su K, Ding S C, He Q, Zhang J C, Zhang C F, Hao Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 088102 (in Chinese) [邢雨菲, 任泽阳, 张金凤, 苏凯, 丁森川, 何琦, 张进成, 张春福, 郝跃 2022 物理学报 **71** 088102]
- [17] Ren Z, Zhang J, Zhang J, Zhang C, Chen D, Quan R, Yang J, Lin Z, Hao Y 2017 *AIP Adv.* **7** 125302
- [18] Imura, M, Banal R G, Liao M, Liu J, Aizawa T, Tanaka A 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 025702
- [19] Liu J L, Zheng Y T, Lin L Z, Zhao Y, Chen L X, Wei J J 2018 *J. Mater. Sci.* **53** 13030
- [20] Liu J L, Yu H, Shao S W, Tu J P, Zhu X H, Yuan X L, Wei J J, Chen L X, Ye H T, Li C M 2020 *Diamond Relat. Mater.* **104** 107750
- [21] Sasama Y, Komatsu K, Moriyama S, Imura M, Takahide Y 2018 *APL Mater.* **6** 111105
- [22] Sasama Y, Kageura T, Imura M, Watanabe K, Taniguchi T, Uchihashi T, Takahide Y 2022 *Nat. Electronics* **5** 37
- [23] Su J, Li Y, Li X, Yao P, Tang W 2014 *Diamond Relat. Mater.* **42** 28
- [24] An K, Liu J L, Lin L Z, Zhang B Y, Zhao Y, Guo Y Z, Tomasz O, Chen L X, Wei J J, Li C M 2018 *Surf. Technol.* **47** 11 (in Chinese) [安康, 刘金龙, 林亮珍, 张博羿, 赵云, 郭彦召, Tomasz O, 陈良贤, 魏俊俊, 李成明 2018 表面技术 **47** 11]
- [25] Lindblom J 2005 *Am. Mineral* **90** 428
- [26] Crawford, Kevin G, Tallaire, Alexandre X, Macdonald, David A, Dongchen M, David A J 2018 *Diamond Relat. Mater.* **84** 48
- [27] Geis M W, Varghese J O, Vardi A, Kedzierski J, Zhang B 2021 *Diamond Relat. Mater.* **118** 108518
- [28] Tang S, Liu H, Tian Y, Chen D, Zhou J 2021 *Spectrochim. Acta, Part A* **262** 120092
- [29] Xing K, Xiang Y, Jiang, M, Creedon, D L, Qi D C 2020 *Appl. Surf. Sci.* **509** 144890
- [30] Verona C, Arciprete F, Foffi M, Limiti E, Marinelli M, Placidi E 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 180602
- [31] Ogawa S, Yamada T, Kadowaki R, Taniguchi T, Abukawa T, Takakuwa Y 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 144303
- [32] Mirabedini P S, Debnath B, Neupane M R, Greaney P A, Ivanov T G 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 121901
- [33] Gorbachev R V, Riaz I, Nair R, Jalil R, Britnell L, Belle B D, Hill E W, Novoselov K S, Watanabe K, Taniguchi T, Geim A K, Blake P 2011 *Small* **7** 465
- [34] Verona C, Ciccognani W, Colangeli S, Limiti E, Marinelli M, Verona R G 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 025104
- [35] Li Y, Zhang J, Liu G, Ren Z, Zhang J, Hao Y 2018 *Phys. Status Solidi RRL* **12** 1700401

# Synthesis of h-BN/diamond heterojunctions and its electrical characteristics\*

Jia Yan-Wei<sup>1)</sup> He Jian<sup>1)</sup> He Meng<sup>1)</sup> Zhu Xiao-Hua<sup>1)</sup> Zhao Shang-Man<sup>1)</sup>  
Liu Jin-Long<sup>1)2)†</sup> Chen Liang-Xian<sup>1)</sup> Wei Jun-Jun<sup>1)2)</sup> Li Cheng-Ming<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

2) (*Graduate School University of Science and Technology Beijing, Foshan 528300, China*)

( Received 19 May 2022; revised manuscript received 11 July 2022 )

## Abstract

Conductive channel on the surface of hydrogen terminated diamond with two-dimensional h-BN passivation exhibits high hole mobility. However, the current h-BN passivated diamond mainly uses the method of mechanical peeling, which cannot achieve a large-size conductive channel and is difficult to meet the actual application requirements. In this study, the effect of classical transfer h-BN on the conductive channel on the surface of hydrogen terminated diamond is studied. High-quality single crystal diamond is epitaxially grown by microwave chemical vapor deposition (MPCVD) and the hydrogen terminated diamond is obtained by surface hydrogenation treatment. H-BN/H-diamond heterojunctions with different layers of h-BN are prepared by wetting transfer, and the characteristics of channel carrier transport are systematically studied. The results show that the channel conductivity is significantly enhanced after h-BN transfer, and with the increase of h-BN thickness, the enhancement effect of channel conductivity tends to be stable. The transfer of multilayer h-BN can increase the carrier density on the surface of hydrogen terminated diamond by nearly 2 times, and the square resistance is reduced to 50%. The current results show that the h-BN/H-diamond heterojunction may have a transfer doping effect, resulting in a significant increase in carrier density. With the increase of the channel carrier density, the channel mobility on the surface of the h-BN passivated diamond remains stable. The H-BN absorbs on the surface of the diamond, so that the negative charge originally on the surface of the hydrogen termination moves to the surface of h-BN, and the distance of action increases, weakening the coupling of the negative charge of the hole with the negative charge of the dielectric layer in the conductive channel of the hydrogen terminated diamond, which makes the mobility stable.

**Keywords:** hydrogen terminated diamond, heterostructure, h-BN, wetting transfer

**PACS:** 81.05.Cy, 81.05.ug, 78.30.Am, 73.25.+i

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220995

\* Project supported by the National MCF Energy R & D Program, China(Grant No. 2019YFE03100200), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4192038), and the Nuclear Science Foundation of National Key Laboratory of Nuclear Detection and Nuclear Electronics of China (Grant No. SKLPDE-KF-202202).

† Corresponding author. E-mail: [liujinlong@ustb.edu.cn](mailto:liujinlong@ustb.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [chengmli@mater.ustb.edu.cn](mailto:chengmli@mater.ustb.edu.cn)



## h-BN/diamond异质结的制备与沟道载流子输运性质

贾燕伟 何健 何萌 朱肖华 赵上熿 刘金龙 陈良贤 魏俊俊 李成明

## Synthesis of h-BN/diamond heterojunctions and its electrical characteristics

Jia Yan-Wei He Jian He Meng Zhu Xiao-Hua Zhao Shang-Man Liu Jin-Long Chen Liang-Xian  
Wei Jun-Jun Li Cheng-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 228101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220995

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220995>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 六方氮化硼层间气泡制备与压强研究

Synthesis and pressure study of bubbles in hexagonal boron nitride interlayer

物理学报. 2021, 70(6): 069801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201482>

#### 六方氮化硼表面石墨烯纳米带生长与物性研究

Synthesis and characterization of graphene nanoribbons on hexagonal boron nitride

物理学报. 2019, 68(16): 168102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191036>

#### Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>/h-BN/石墨烯二维异质结器件中的高效率自旋注入

Efficient spin injection in Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>/h-BN/graphene heterostructure

物理学报. 2021, 70(12): 129101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202136>

#### 二维平面和范德瓦耳斯异质结的可控制备与光电应用

Controllable preparation and photoelectric applications of two-dimensional in-plane and van der Waals heterostructures

物理学报. 2021, 70(2): 027901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201419>

#### 氢终端单晶金刚石反相器特性

Characteristics of hydrogen terminated single crystalline diamond logic inverter

物理学报. 2022, 71(8): 088102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211447>

#### 铁电极化翻转对硅烯异质结中电子性质的调控

Control of electric properties of silicene heterostructure by reversal of ferroelectric polarization

物理学报. 2022, 71(17): 177303 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220815>