



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102933491 B

(45) 授权公告日 2016.02.17

(21) 申请号 201180027996.X

(22) 申请日 2011.06.06

(30) 优先权数据

P-391416 2010.06.07 PL

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012.12.06

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/PL2011/050023 2011.06.06

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/155858 EN 2011.12.15

(73) 专利权人 电子材料技术研究所

地址 波兰华沙

(72) 发明人 沃齐米日·施特鲁平斯基

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 顾晋伟 董文国

(51) Int. Cl.

C01B 31/04(2006.01)

C30B 25/02(2006.01)

C30B 29/02(2006.01)

C30B 25/18(2006.01)

C30B 29/64(2006.01)

(56) 对比文件

CN 101602503 A, 2009.12.16, 权利要求1.

J. J. Wang et. al. "Free standing

subnanometer graphite sheet". 《Appl. Phys. Lett. 》. 2004, 第85卷(第7期), P1265-1267.

J. J. Wang et. al. "Free standing subnanometer graphite sheet". 《Appl. Phys. Lett. 》. 2004, 第85卷(第7期), P1265-1267.

Konstantin V. Emtsev et. al. "Towards wafer-size grapheme layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide". 《nature materials》. 2009, 第8卷(第3期), P203-207.

Konstantin V. Emtsev et. al. "Towards wafer-size grapheme layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide". 《nature materials》. 2009, 第8卷(第3期), P203-207.

S. Weingart. "Influence of the growth conditions of epitaxial graphene on the film topography and the electro transport properties". 《Physica E》. 2009, 第42卷第687-690页.

审查员 周洋

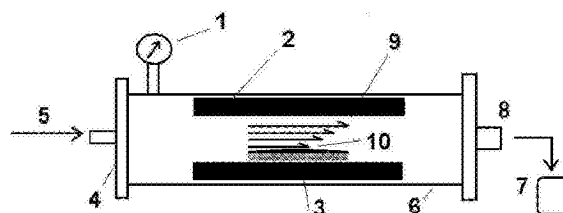
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

石墨烯的生产方法

(57) 摘要

本发明涉及一种通过气相外延在含 SiC 表面的衬底上生产石墨烯的方法, 其特征在于通过惰性气体或除惰性气体以外的气体流经外延反应器来控制硅从衬底升华的过程。本发明还涉及通过该方法获得的石墨烯。



B)

1. 一种通过气相外延在含 SiC 表面的衬底上生产石墨烯的方法,该方法包括:
石墨烯核生长过程,其中通过所述衬底的受控硅升华促进石墨烯核在所述衬底上的生长;以及
石墨烯的沉积过程,其中在所述石墨烯核上沉积外延石墨烯层;
其中通过惰性气体 (10) 或除惰性气体以外的气体 (12) 流经外延反应器来控制硅从所述衬底 (3) 升华的过程,其中所述除惰性气体以外的气体 (12) 为使得升华速度高于气体与在晶片表面上出现的碳层的反应速度的气体,
其中最初所述惰性气体 (10) 的流量为 6 升 / 分钟至 70 升 / 分钟,随后所述惰性气体 (10) 的流量降低至低于 6 升 / 分钟的值。
2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于最初所述惰性气体 (10) 的流量为 18 升 / 分钟至 26 升 / 分钟,随后所述惰性气体 (10) 的流量降低至低于 6 升 / 分钟的值。
3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于在所述外延之前是在 1400℃ 至 2000℃ 的温度下蚀刻衬底 (3) 的步骤。
4. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于在所述外延之前是在 1400℃ 至 1700℃ 的温度下蚀刻衬底 (3) 的步骤。
5. 根据权利要求 3 所述的方法,其特征在于在 10 毫巴至 1000 毫巴的压力下进行所述蚀刻。
6. 根据权利要求 3 所述的方法,其特征在于在 50 毫巴至 100 毫巴的压力下进行所述蚀刻。
7. 根据权利要求 3 至 6 中任一项所述的方法,其特征在于在气体气氛中进行所述蚀刻,所述气体气氛包含氢气。
8. 根据权利要求 7 所述的方法,其特征在于所述气氛还包含丙烷、硅烷、它们的混合物或其他烃。
9. 根据权利要求 7 所述的方法,其特征在于在所述气体流量为 5 升 / 分钟至 90 升 / 分钟下进行所述蚀刻。
10. 根据权利要求 7 所述的方法,其特征在于在所述气体流量为 70 升 / 分钟至 90 升 / 分钟下进行所述蚀刻。
11. 根据权利要求 8 所述的方法,其特征在于在包含硅烷的气氛中进行所述蚀刻,并且所述硅烷气体流量为 1 毫升 / 分钟至 100 毫升 / 分钟。
12. 根据权利要求 8 所述的方法,其特征在于在包含硅烷的气氛中进行所述蚀刻,并且所述硅烷气体流量为 5 毫升 / 分钟至 10 毫升 / 分钟。
13. 根据权利要求 8 所述的方法,其特征在于在包含丙烷 (12) 的气氛中进行所述蚀刻,并且所述丙烷气体 (12) 流量为 1 毫升 / 分钟至 100 毫升 / 分钟。
14. 根据权利要求 8 所述的方法,其特征在于在包含丙烷 (12) 的气氛中进行所述蚀刻,并且所述丙烷气体 (12) 流量为 5 毫升 / 分钟至 10 毫升 / 分钟。
15. 根据权利要求 1-6 中任一项所述的方法,其特征在于所述衬底 (3) 是 SiC 衬底,其具有以下多型体之一:4H-SiC、6H-SiC 或 3C-SiC。
16. 根据权利要求 15 所述的方法,其特征在于在所述衬底 (3) 的具有 Si 极性的一侧进行外延。

17. 根据权利要求 1-6 中任一项所述的方法,其特征在于所述惰性气体(10)是稀有气体。

18. 根据权利要求 1-6 中任一项所述的方法,其特征在于所述惰性气体(10)是氩。

19. 根据权利要求 17 所述的方法,其特征在于所述惰性气体(10)是氩,并且所述氩(10)的压力为 10^{-4} 毫巴至大气压。

20. 根据权利要求 1-6 中任一项所述的方法,其特征在于所述惰性气体(10)是氩,所述衬底(3)是 SiC 衬底并保持在高于 1100°C 的温度下,调节所述反应器中的氩(10)压力和通过所述反应器的氩(10)的流量的乘积,使得在所述衬底(3)的所述表面上方产生防止硅升华(9)的阻滞氩层。

石墨烯的生产方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石墨烯的生产方法。更具体地,本发明涉及通过气相外延获得石墨烯的方法以及在该过程中控制其生长和成核的方法。

背景技术

[0002] 石墨烯是碳原子排布在六面体晶格上呈蜂巢状的平坦二维片层,每个晶胞有两个原子(K. S. Novoselov 等 . Science 306,666(2004) ;A. K. Geim, K. S. Novoselov, Nat. Mat. 6(2007)183 ;Y. B. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer 和 P. Kim, Nature 438,201(2005))。碳原子为 sp^2 杂化态。它们中的每一个通过 σ 型键与另外三个碳原子连接。石墨烯的电子结构与常见的三维材料颇为不同。其费米面的特征在于六个双锥。在天然(未掺杂)石墨烯中,费米能级位于这些锥的连接点。由于在该点材料的态密度为零,所以天然石墨烯的导电率很低。但是,可以通过电场来改变费米能级,使得材料根据所施加的场的极性而变为 n - 掺杂(具有电子)或 p - 掺杂(具有空穴)。

[0003] 在费米能级附近,电子与空穴的分散关系是线性的。因为有效品质是由能带的弯曲来提供的,所以其对应于有效品质为零。描述石墨烯中的激发的方程在形式上与以恒速运动的无品质费米子的狄拉克方程相同。因此,锥的连接点被称为狄拉克点。

[0004] 近年来进行的大量实验证实,在石墨烯中,电子的行为类似于狄拉克费米子,其特征不在于异常量子霍尔效应,并且在石墨烯中的输运是弹道性质的(M. L. Sadowski, G. Martinez, M. Potemski, C. Berger 和 W. A. de Heer, Phys. Rev. Lett. 97,266405(2006), D. L. Miller, K. D. Kubista, G. M. Rutter 等 . Science 324,924(2009))。石墨烯的特殊电子特性及其高化学稳定性使其成为未来电子器件的特别有吸引力的候选(Novoselov K. S., Geim A. K., Nature Materials 6,183(2007))。在石墨烯中,载流子的迁移率非常高,达到 $200000\text{cm}^2/\text{Vs}$,这比硅晶体管的情况高出多于一个数量级([Lin Y. M. 等 . Science 327, 662(2010))。这保证了若干微米量级的距离的弹道输运。此外,石墨烯中的电流密度保持比铜 ($108\text{A}/\text{cm}^2$) 高出多于 100 倍(M. Wilson, Phys. Today, 第 21 页 (2006 年 1 月))。

[0005] 可以通过若干种方法获得石墨烯。由 K. S. Novoselov 和 A. K. Geim 开发的第一种方法是用透明胶带条机械剥离石墨块直至得到单层石墨烯。所产生的薄片表现出显著高的载流子迁移率。因为该方法仅允许制造小尺寸的石墨烯样本(从几百平方微米到数千平方微米)加之低效的薄片筛选过程,所以它并非用于大量生产的实用方法。

[0006] 基于关于碳化硅表面石墨化的早期报道(A. J. Van Bommel, J. E. Crombeen 和 A. Van Tooren, Surf. Sci. 48,463(1975) ;I. Forbeaux, J. -M. Themlin 和 J. -M. Debever PHYSICAL REVIEW B VOLUME 58, NUMBER 24(1998)) 而由 W. de Heer 和 C. Berger(C. Berger, Z. Song, T. Li, X. Li 等, J. Phys. Chem., B 108,19912(2004) ;W. A. de Heer, C. Berger, X. Wu 等 . Solid State Commun. 143,92(2007) ;K. V. Emtsev 等, Nat. Mater. 8,203(2009)) 设计的第二种方法涉及:由于硅在达高于 1100°C 的高温下升华,所以在真空条件下在 SiC 表面上获得薄碳层。在这样的温度下,硅从表面蒸发,表面进而变得富含碳。存在于表面上的碳是稳定

的,即使在一个或两个原子层的形式下也是如此。这就是如何能够得到具有数个至数十个碳原子层的厚度的石墨烯。通过在反应室中在 SiC 升华过程中产生的硅的初始分压的产生以及通过随后在接近平衡的条件下进行该过程来控制石墨烯的生长速度。在以下中提出的该方法的一个变化方案使得石墨烯能够在降低的压力或大气压于氩气氛中生长: K. V. Emtsev 等, Nat. Mater. 8, 203 (2009); W. Strupinski 等, Mater. Science Forum 卷号. 6 15-6 17 (2009)。通过调节该过程的压力 (100 毫巴至 1 巴) 和温度 (1100°C 至 1180°C), 可以控制石墨烯生长速度。所述方法是目前最广泛使用的方法。该方法的缺点包括: 难于在真空条件下获得 Si 的平衡压力, 这限制了其工业应用; 并且石墨烯的品质取决于发生硅升华的 SiC 衬底的品质, 这导致石墨烯参数的不均一性。

[0007] 另一方法是在金属表面 (如镍、钨或铜) 上沉积碳原子层。在这种情况下采用用于沉积薄膜的公知的 CVD (化学气相沉积) 技术。碳源包括甲烷、丙烷、乙炔和苯, 它们都在高温下分解。所释放的碳沉积在金属衬底上。在电子应用中, 一个必不可少的后续步骤是使石墨烯从导电性金属上脱离 (通过将金属溶解于化学试剂中), 并将其置于分离的衬底上 (Kim, K. S. 等, Nature 2009, 457; Reina, A. 等, J. Nano Lett. 2009, 9)。石墨烯再定位的方法具有制约工业实施的严重局限性。在再定位过程中, 石墨烯分裂为较小部分。除此之外, 与碳化硅表面相比, 金属表面不够平滑。

[0008] 还有另外两种获得石墨烯的方法, 其由以下组成: 石墨烯氧化物的化学还原 (Park, S., Ruoff, R. S. Nat. Nanotechnol. 2009, 4, 217-224; Paredes, J. I., Villar-Rodil, S. 等, Langmuir 2009, 25 (10), 5957-5968), 以及将石墨溶解于溶剂中 (Blake, P. Brimicombe, P. D. Nair 等, Nano Lett. 2008, 8 (6), 1704-1708; Hernandez, Y. Nicolosi, V. Lotya 等, J. N. Nat. Nanotechnol. 2008, 3, 563-568), 然后蒸发薄片形式的碳固相提取物。但是, 通过这些方法获得的石墨烯的品质特别低。

[0009] 在碳外延 (CVD) 的情况下, SiC (碳化硅) 衬底 (根据需要, 其特征为高阻 (半绝缘) 或低阻) 证实对于电子应用而言是有吸引力且合适的。(具有石墨烯层的导电性金属衬底使得不能生产例如晶体管)。CVD 过程需要高温。较低的范围受到气相碳前体的热分解温度 (约 1000°C) 的限制。但是, 所需结构品质的石墨烯的生长需要在 1500°C 至 1800°C 的温度下进行。这样的温度引起 SiC 衬底分解, 或者换言之, 硅升华, 从外延的观点出发这是不利的。实现了在外延生长温度之前通过发生硅升华引起石墨烯生长 (在约 1300°C)。因此, 对于石墨烯参数最重要的第一碳原子层将通过公知的硅蒸发形成, 而非通过 CVD 外延。此外, 在 CVD 外延完成之后, 将发生不受控的升华, 引起后续碳层的进一步非期望生长。因此, 本发明的目的是提出一种通过气相外延 (CVD) 生产石墨烯的方法, 其中, 由于控制硅从 SiC 衬底升华的过程的缘故可以使用 SiC 衬底。本发明的目的还在于通过该衬底的受控硅升华来促进石墨烯核在 SiC 衬底上的生长, 然后在如此得到的具有限定几何构型 (岛) 的核上沉积外延石墨烯层。应用 CVD 外延来生产石墨烯允许在 SiC 衬底的 C- 面 (000-1) 以及 Si- 面上 (在 Si 升华的情况下无法完成) 生长较厚的乱层 (turbostatic) 石墨烯层。此外, 中断 CVD 外延并加入化学反应掺杂剂使得能够改变石墨烯的电子结构 (费米能级和狄拉克点的能分离)。但是关键的是在中断石墨烯生长之后没有进一步的不受控升华或蚀刻过程。

[0010] 发明概述

[0011] 根据本发明,在含 SiC 表面的衬底上通过气相外延来获得石墨烯的方法的特征在于通过惰性气体或除惰性气体以外的气体流经外延反应器来控制硅从衬底升华的过程。更具体地,通过在 SiC 衬底晶片表面的上方流动的气体分子的线速度。其使得单层碳沉积。

[0012] 优选地,所述气体流量为 6 升 / 分钟至 70 升 / 分钟,更优选为 18 升 / 分钟至 26 升 / 分钟。流经反应器的气体的平均线速度需高于 3cm/s 或者高于该特定反应器特有的值。

[0013] 在另一优选实施方案中,所述气体流量为低于 6 升 / 分钟,其完全地防止硅从衬底升华。流经反应器的气体的平均线速度需低于 3cm/s 或者低于该特定反应器特有的值。

[0014] 在本发明的一个实施方案中,最初所使用的惰性气体流量为 6 升 / 分钟至 70 升 / 分钟,或者更优选地为 18 升 / 分钟至 26 升 / 分钟,其允许在衬底的受控硅升华过程中于 SiC 衬底表面上形成石墨烯核。随后,将惰性气体流量降低至低于 6 升 / 分钟,防止进一步的硅升华,并在如此得到的核上进行气相外延。在使用除惰性气体以外的气体时,升华速度必须高于气体与在晶片表面上出现的碳层的反应速度。

[0015] 使前述流量适于特定外延反应器,即由 Aixtron(德国)生产的 VP508 系统。26 升 / 分钟的气体流量可以被增加(而不影响生长过程),但是这是所述装置中流量计量的上限值。在具有不同几何构型的反应器中,流量可不同,并且需要根据本领域技术人员公知的原理在实验中进行选择。还可使用模拟气体流经反应器的结果,包括量子现象。需要进行实验验证。

[0016] 优选地,在外延之前于 1400°C 至 2000°C、更优选 1400°C 至 1700°C 的温度下蚀刻衬底。

[0017] 在本发明的优选实施方案中,所述蚀刻在 10 毫巴至 1000 毫巴或者更优选 50 毫巴至 100 毫巴的压力下发生。

[0018] 蚀刻也可在较高压力下进行;但是,没有任何动机这样做,因为无论如何蚀刻后都需要降低压力以进行外延。未发现较高压力下的蚀刻引起较高的品质。

[0019] 优选地,所述蚀刻在包括氢气的气体气氛中发生。更优选地,前述气氛还包括丙烷、硅烷、它们的混合物或其他烃。

[0020] 优选地,以 3 升 / 分钟至 90 升 / 分钟或者更优选 70 升 / 分钟至 90 升 / 分钟的所述气体流量进行所述蚀刻。

[0021] 根据本发明,如果所述蚀刻在含氢气的气氛中进行,则所使用的氢气的流量优选为 70 升 / 分钟至 90 升 / 分钟。如果所述蚀刻在含硅烷的气氛中进行,则所使用的硅烷的气体流量优选为 1 毫升 / 分钟至 100 毫升 / 分钟,更优选为 5 毫升 / 分钟至 10 毫升 / 分钟。如果所述蚀刻在含丙烷的气氛中进行,则所使用的丙烷流量优选为 1 毫升 / 分钟至 100 毫升 / 分钟或者更优选为 5 毫升 / 分钟至 10 毫升 / 分钟。

[0022] 优选地,使用了具有以下多型体(polytypes)之一的 SiC 衬底:4H-SiC、6H-SiC 或 3C-SiC。

[0023] 优选地,随后在衬底的具有 Si 极性的一侧进行外延。

[0024] 在本发明的优选实施方案中,所述惰性气体是稀有气体,优选氩。

[0025] 如果所述惰性气体是氩,氩压力优选为 10⁻⁴ 毫巴至大气压。

[0026] 氩是本发明方法的最佳选择。其余惰性气体也证实了适合用于外延,但是在实践中罕有使用,这是由于它们的高价格以及这些气体和净化器二者受限的可用性。使用除氩

以外的惰性气体需要改变前述流量,这是由于与氩不同的气体分子品质。如果过程参数导致经过蚀刻以碳层的产生过程为主,则可以使用非惰性气体如氢气。

[0027] 在本发明的一个优选实施方案中,所述惰性气体是氩, SiC 衬底保持在高于 1100℃ 的温度下,调节反应器中氩的压力和通过反应器的氩的流量的乘积,使得在衬底表面上方产生阻滞氩层和防止硅升华的具有足够低的线速度的后续氩层,其阻滞硅从 SiC 衬底表面升华。

[0028] 本发明还包括通过前述方法获得的石墨烯。

附图说明

[0029] 现将参照附图在优选实施方案中对本发明进行更详细的描述,在附图中:

[0030] 图 1 示出用于实施本发明的一种用于碳化硅外延的市售装置。该装置 (VP508 型) 由 AIXTRON AG (德国) 生产。

[0031] 图 2 示出用于实施本发明的 Aixtron VP508 系统的反应室的示意图;

[0032] 图 3A)–3E) 示出控制硅从 SiC 衬底表面升华的机制和通过丙烷 CVD 过程的石墨烯沉积的机制;

[0033] 图 4A) 示出隧道显微镜图,其证实在实施例 4 中得到了 SiC 表面上的薄石墨烯层;

[0034] 图 4B) 示出拉曼光谱的结果,其证实在实施例 4 中得到了 SiC 表面上的薄石墨烯层;以及

[0035] 图 5 示出分离石墨烯岛的隧道显微镜图。

[0036] 此外,在图 2 和图 3A)–3E) 中使用了以下数字符号:1–压力计;2–加热器;3–衬底;4–室闭合件;5–气体入口;6–石英管;7–泵;8–气体出口;9–Si 升华;10–氩;11–石墨烯核;12–丙烷。

[0037] 本发明的优选实施方案

[0038] 实施例 1

[0039] 使用市售 VP508 反应器 (图 1) 和市售碳化硅衬底来通过 CVD (化学气相沉积) 进行石墨烯外延,所述市售碳化硅衬底是多型体的 4H-SiC, 6H-SiC 或 3C-SiC 且具有取向 (0001) 或 (000-1)。还使用了可得自生产商如 Cree (美国) 和 SiCrystal (德国) 的具有 0 至 8 度切角的衬底。衬底表面 (称为“外延即用型”) 由生产商预先制备好。此外,在适当的石墨烯生长之前,在外延反应器中于 1600℃ 和 100 毫巴的压力下在氢气和丙烷或硅烷的混合物中蚀刻衬底。氢气的流量为 60 升 / 分钟,而丙烷 / 硅烷的流量为 5 毫升 / 分钟至 10 毫升 / 分钟。根据所使用的加热器,衬底的尺寸不同 – 从尺寸为 10mm × 10mm 的正方形样本到直径为 2 或 3 英寸至 100mm 的晶片。

[0040] 在退火时,置于反应器 (图 2) 中的 SiC 衬底 3 经历热分解 (硅从表面升华)。如果退火在氢气氛中进行,那么形成于表面上的碳与氢气反应,其结果是后续 SiC 层被蚀刻。用氩代替氢气或者使用真空导致由后续 SiC 原子层的热分解引起衬底表面上的碳成层 (图 3A)。硅升华效率随温度增加和压力降低而升高。由于碳原子的充分重构,所以在表面上获得后续的石墨烯层。所施用的氩 10 流量为 10-4 毫巴至大气压。如果衬底 3 表面上方的氩分子的线速度足够高,那么所述流动气体不抑制升华 9。如果所示线速度降低至低于临界值,即反应器中的压力和经过反应器的流量 (表示为升 / 分钟) 的乘积,那么在衬底 3 的表

面上方产生了所谓氩的“阻滞层 (stagnant layer)”。从衬底 3 开始的后续层随速度的增加而移动。气体层 (其速度取决于压力和流量) 抑制硅从表面升华至周围环境中 (图 3B)。对于反应器的特定几何构型, 作为阻滞层形成过程和从衬底开始的后续层的气体速度降低的表征, 流量和压力的乘积将不同, 并在实验中进行调节。在 VP508 反应器的情况下, 使用了 6 升 / 分钟的氩 10 流量和 100 毫巴的压力以完全抑制升华 9。如果氩 10 流量增加至 26 升 / 分钟 (对于 VP508), 那么阻滞层的厚度将降低, 使得再次发生硅升华 9 (图 3C) (后续气体层 (从与衬底 3 接触的第一阻滞层开始) 的速度将升高)。因此, 通过调节氩 10 流量, 可以调节抑制升华 9 的气体层的厚度 (高于或低于开始 / 停止升华的常规速度的原子气体层的数目), 从而调节升华 9 的效率, 从反应器中最有效的温度和压力开始并继续直至升华 9 被完全阻滞。这就是如何能够以精确受控的方式通过升华获得石墨烯层。图 4 示出隧道显微镜图 (A) 和由拉曼光谱测量的结果 (B), 其证实获得了 SiC 表面上的薄石墨烯层。通过椭圆偏振法确定了石墨烯厚度, 发现其为 7 个碳原子层。

[0041] 实施例 2

[0042] 该方法类似于实施例 1 所述的方法, 区别仅在于进行了非常短的时间的升华: 在 100 毫巴的压力下, 在 10 秒中内氩流量为 26 升 / 分钟或者在 4 分钟内流量降低至 20 升 / 分钟。这样, 通过在适当的短时间内开始升华从而在 SiC 衬底 3 表面上诱导碳 11 的小目标 (岛) 的生长 (图 3D)。碳岛 11 可以作为通过升华获得的核而任选地用于后续石墨烯生长。图 5 示出呈现分离石墨烯岛的隧道显微镜图。

[0043] 实施例 3

[0044] 该方法类似于实施例 1 所述的方法, 区别是在蚀刻后, 应用低的氩 10 流量 (6 升 / 分钟, 在 100 毫巴的压力下), 不允许硅从衬底表面升华。由于 CVD 过程并将气体 (即 2 毫升 / 分钟的丙烷 12 (图 3E)) 引入反应器中, 进行了石墨烯生长。虽然在这样的条件下硅升华被抑制, 但是丙烷 12 分子扩散通过缓慢位移的层或者阻滞气体进入衬底 3 表面。因此, 受控厚度的石墨烯层沉积在 SiC 表面上, 其不经历升华。通过调节丙烷 12 流经反应器的时间和流量来完成控制。分离丙烷 12 结束沉积。在具有 (0001) 和 (000-1) 表面的 SiC 衬底 3 上进行石墨烯生长。所获得的石墨烯的特征在于与通过升华获得的石墨烯参数类似, 但表现出更高的带电载流子迁移速率。通过椭圆偏振法测量的石墨烯的厚度可以被控制在 1 至 100 (或更多) 个碳原子层的范围内。

[0045] 实施例 4

[0046] 该方法类似于实施例 2 所述的方法, 区别是在获得分离石墨烯岛 11 之后, 通过将氩 10 流量降低至 6 升 / 分钟来停止升华, 并如实施例 3 所述, 使用用于通过 CVD 法生长的作为核的之前所得的岛 11 来开始通过 CVD 进行石墨烯生长。在这种情况下, 在初期 (1 至 2 个原子层), 生长是横向的。该方法旨在改善所获得的石墨烯的品质。尽管如此, 基于目前可用的表征方法, 仍然难以确定升华核对减少石墨烯中的缺陷的作用。

[0047] 实施例 5

[0048] 该方法类似于实施例 3 所述的方法, 区别是在石墨烯沉积之前, 在 SiC 衬底 3 上进行 SiC 外延以改善表面形态的品质。然后石墨烯沉积在所修饰的衬底上。获得了显著改进的品质和更好的均一性。然而, 该方法的主要优点是衬底 3 的品质对石墨烯生长过程的影响显著降低。获得了较高的过程可重复性。通过观察碳层的 2D 峰的稳定性和与石墨烯生长

的扰动相关的 D 峰（“缺陷”）的存在 / 振幅而得到的拉曼测量的结果来确定石墨烯品质。

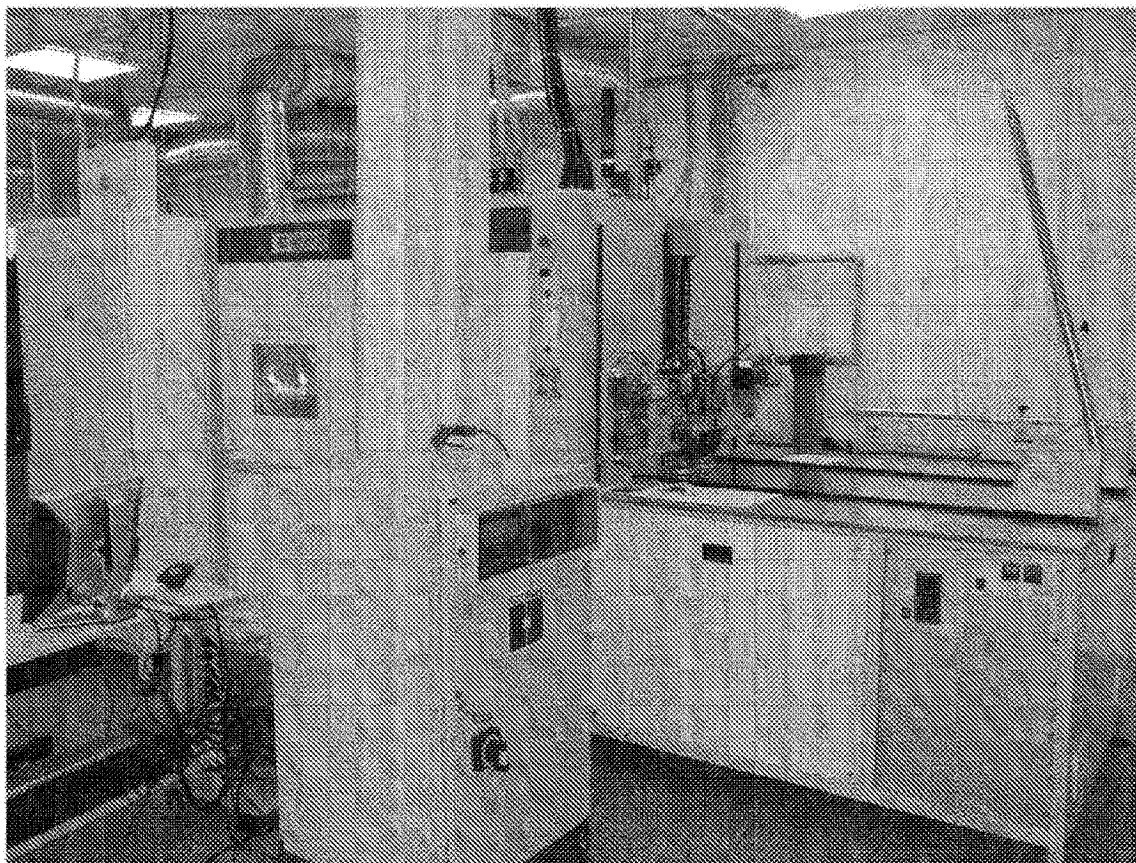


图 1

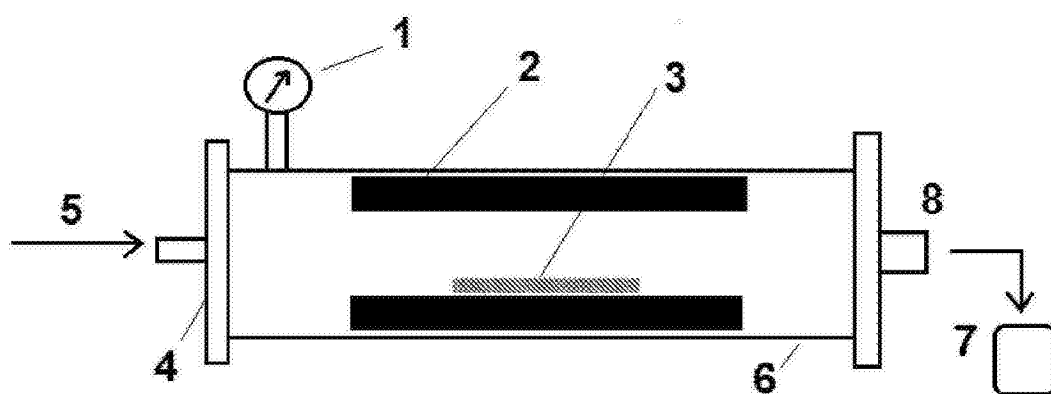
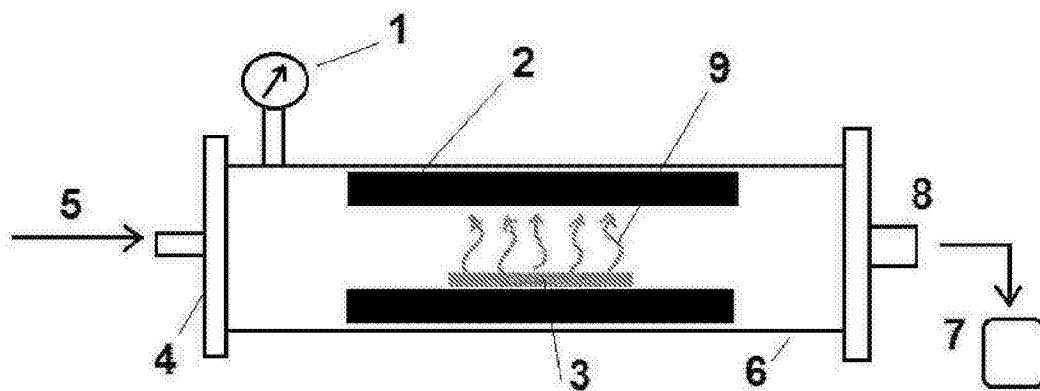
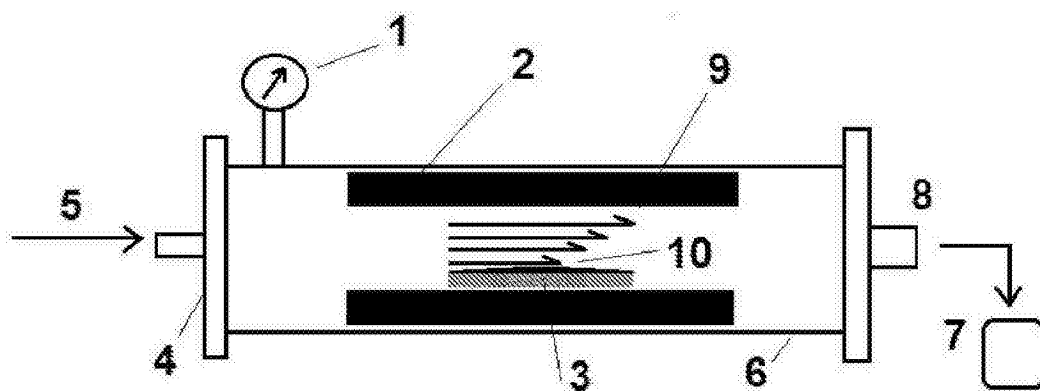


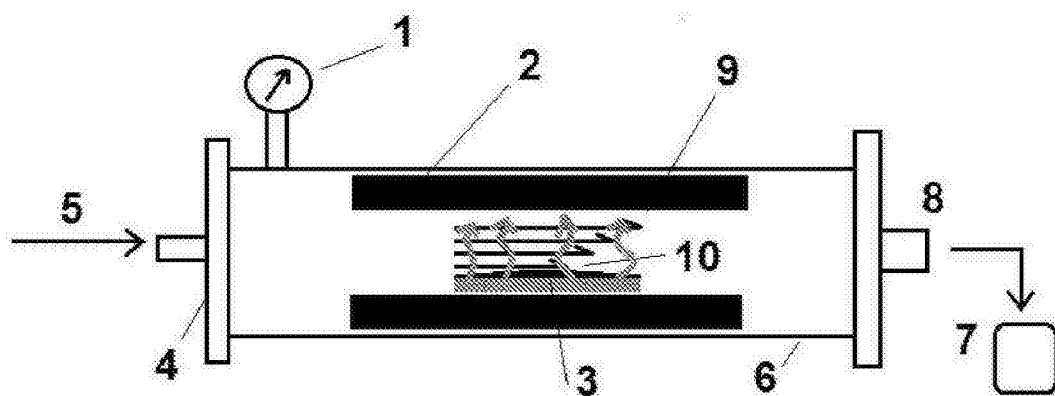
图 2



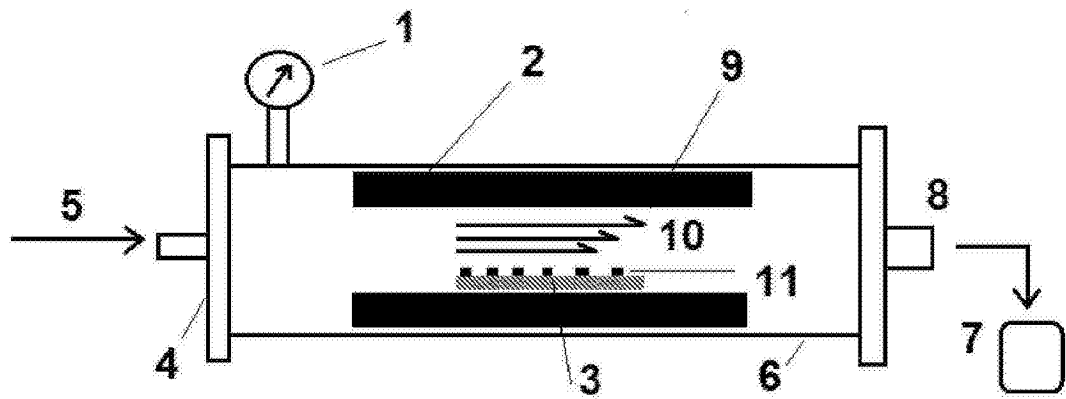
A)



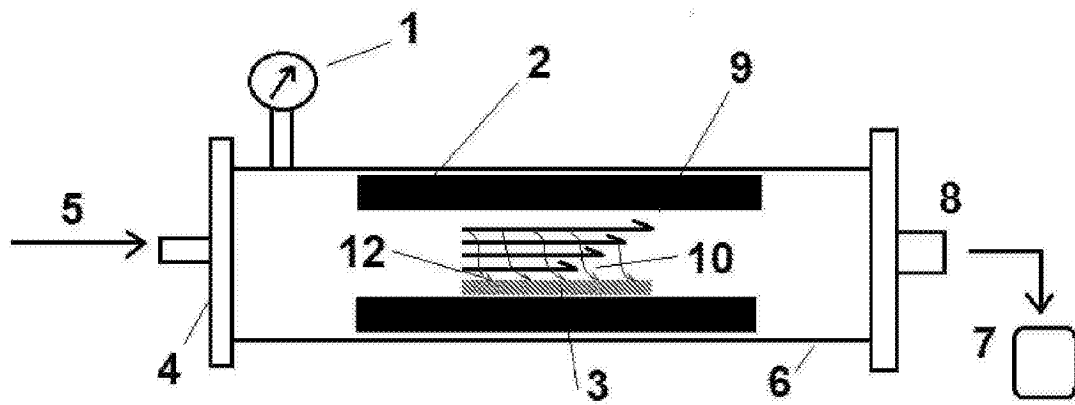
B)



C)



D)



E)

图 3

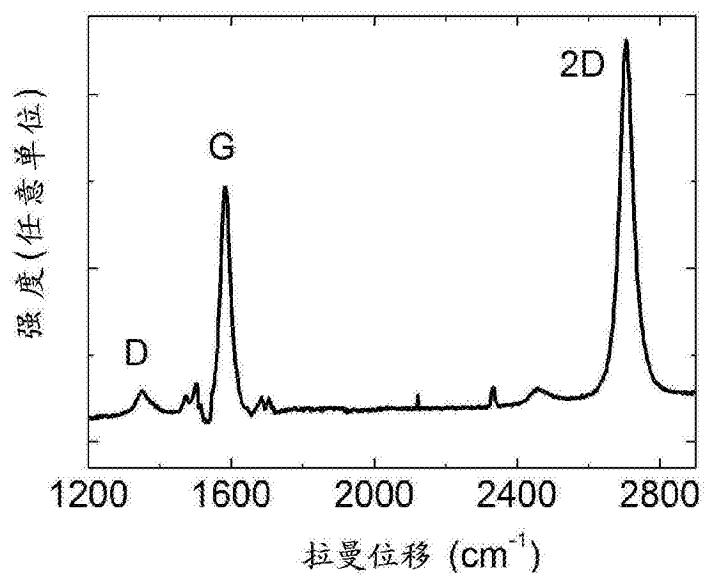
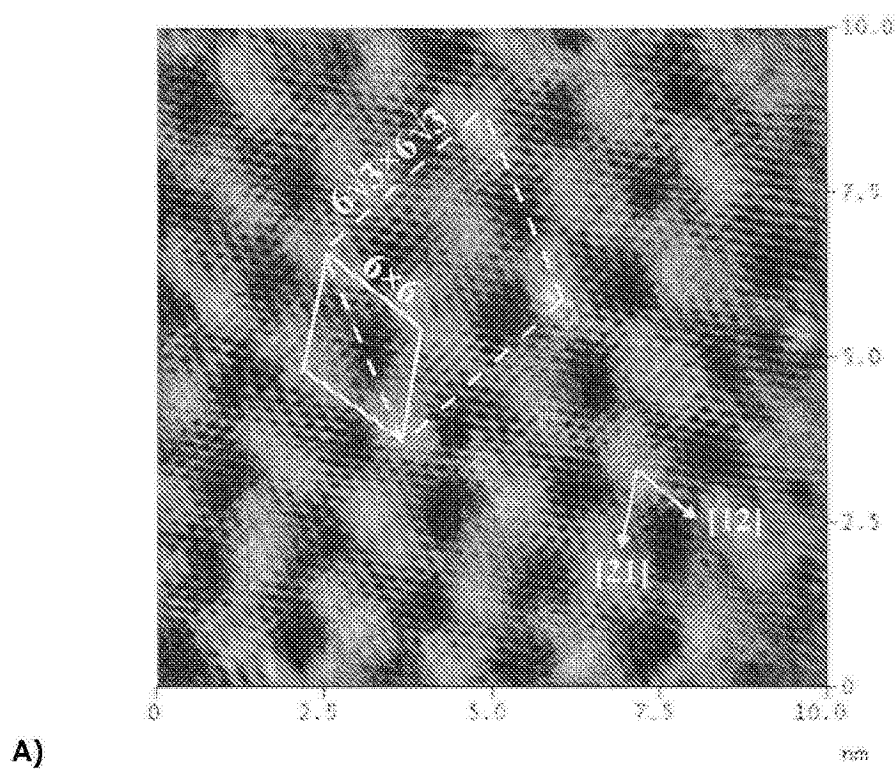


图 4

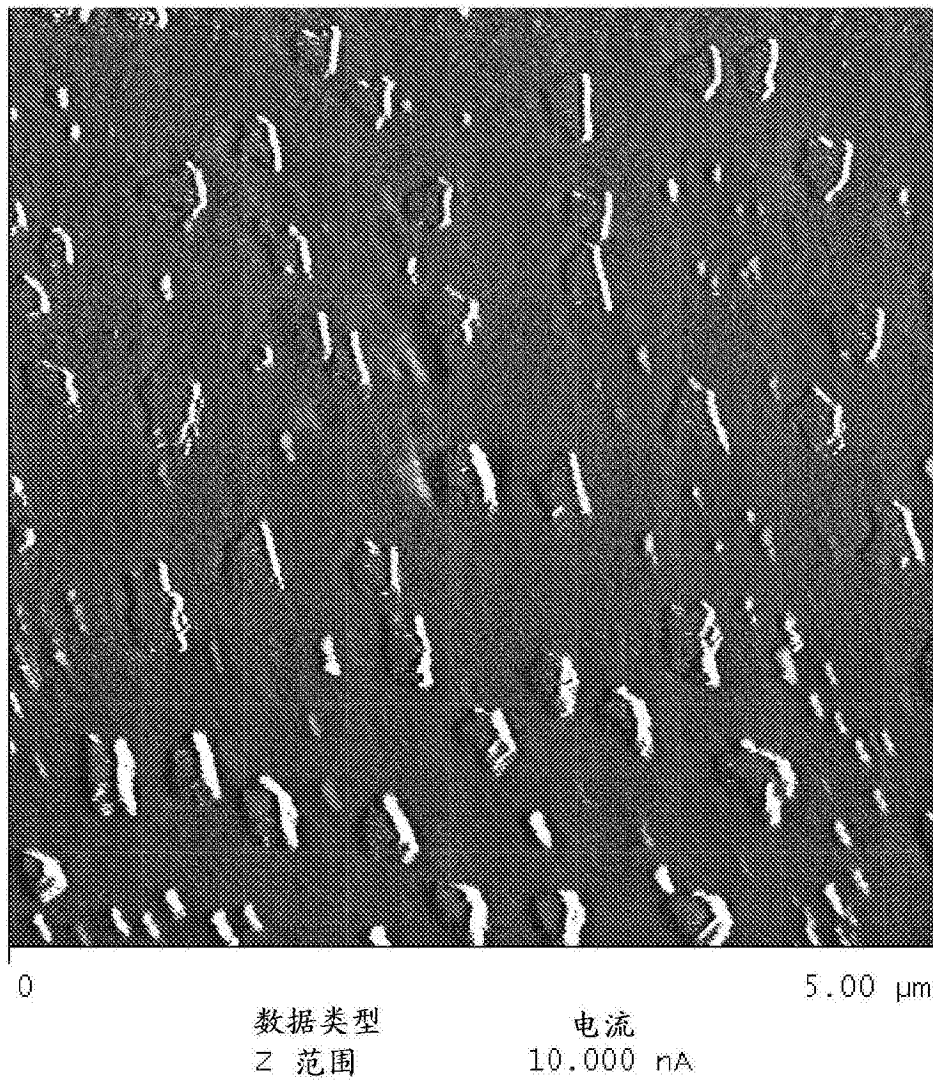


图 5