



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116374999 A

(43) 申请公布日 2023.07.04

(21) 申请号 202310290100.1

B01J 23/75 (2006.01)

(22) 申请日 2023.03.21

B01J 23/755 (2006.01)

(71) 申请人 华中科技大学

B01J 37/16 (2006.01)

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

B01J 37/08 (2006.01)

(72) 发明人 张一雳 孙雷蒙 肖东阳 杜欢欢
王维 汤永威

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

专利代理师 李晓飞

(51) Int. Cl.

C01B 32/16 (2017.01)

C01B 32/162 (2017.01)

C09K 5/14 (2006.01)

B01J 23/745 (2006.01)

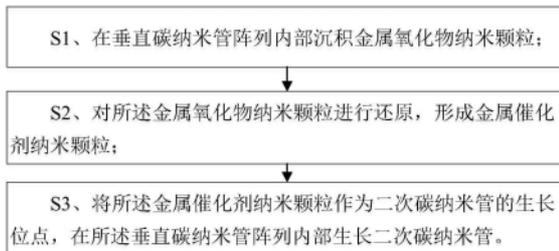
权利要求书1页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料
及其制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料及其制备方法,属于热界面材料领域,方法包括:S1、在垂直碳纳米管阵列内部沉积金属氧化物纳米颗粒;S2、对所述金属氧化物纳米颗粒进行还原,形成金属催化剂纳米颗粒;S3、将所述金属催化剂纳米颗粒作为二次碳纳米管的生长位点,在所述垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管。本发明将二次碳纳米管作为填充材料,能够实现二次碳纳米管的深度填充以及与垂直碳纳米管的共价键连接,减小与垂直碳纳米管间的接触热阻,进而提升垂直碳纳米管阵列的热传输性能,并且维持阵列的低热膨胀系数,保持其热机械稳定性,充分提高垂直碳纳米管阵列在热界面材料领域的应用。



1. 一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料制备方法,其特征在于,包括:
 - S1、在垂直碳纳米管阵列内部沉积金属氧化物纳米颗粒;
 - S2、对所述金属氧化物纳米颗粒进行还原,形成金属催化剂纳米颗粒;
 - S3、将所述金属催化剂纳米颗粒作为二次碳纳米管的生长位点,在所述垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管。
2. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,S1中,采用原子层沉积在垂直碳纳米管阵列内部沉积金属氧化物纳米颗粒。
3. 根据权利要求2所述的制备方法,其特征在于,S2中,采用退火还原法对所述金属氧化物纳米颗粒进行还原。
4. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,S1中,所述垂直碳纳米管阵列的高度为 $10\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ 。
5. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,S1中,沉积次数为400次-1000次。
6. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,S3中,采用化学气相沉积法在所述垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管。
7. 根据权利要求6所述的制备方法,其特征在于,还包括对所述金属催化剂纳米颗粒进行预生长处理,处理时间为1-3min。
8. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,所述金属氧化物纳米颗粒为氧化镍、氧化钴或者四氧化三铁。
9. 一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料,其特征在于,所述热界面材料通过权利要求1-8任意一项所述的制备方法制备得到。

一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于热界面材料技术领域,更具体地,涉及一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料及其制备方法。

背景技术

[0002] 垂直碳纳米管阵列具有良好的一维热传输能力、机械柔韧性和热稳定性,在高功率微电子器件的热界面材料领域和电子器件封装领域都具有广泛的应用,可以被用作产热电子器件和散热器之间的热界面材料以此来实现两者之间快速的热传输,减小热量累积对电子器件造成的损害,延长电子器件的寿命。然而垂直碳纳米管阵列内部存在的大量空气阻碍了热量的传输,使得电子器件产生的热量堆积在阵列内部,不能有效快速的传输到散热器中。因此,在阵列内部填充导热填料减少空气占比,提升垂直碳纳米管阵列的热传输性能。

[0003] 目前常用的导热填料包括陶瓷纳米颗粒、金属纳米颗粒和高分子聚合物材料,它们通常通过溅射法、电子束蒸发等方法沉积到垂直碳纳米管表面,但是这些导热填料的热导率比较低,热传输性能较差,而且它们填充到阵列内部后与阵列内部的碳纳米管表面形成的是物理接触而非共价键接触,会带来较大的接触热阻,仍然会阻碍热量在碳管和导热填料之间的传输。同时,这些填料在阵列内部的填充深度非常有限,很难做到深入填充,仍然会存在大量空气间隙。另外,热界面材料要求具有较低的热膨胀系数,而传统导热填料的热膨胀系数要远大于垂直碳纳米管,填充后会提高垂直碳纳米管的热膨胀系数,导致垂直碳纳米管热机械稳定变差。

发明内容

[0004] 针对现有技术的缺陷和改进需求,本发明提供了一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料及其制备方法,其目的在于提升垂直碳纳米管阵列的热传输性能。

[0005] 为实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供了一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料制备方法,包括:

[0006] S1、在垂直碳纳米管阵列内部沉积金属氧化物纳米颗粒;

[0007] S2、对所述金属氧化物纳米颗粒进行还原,形成金属催化剂纳米颗粒;

[0008] S3、将所述金属催化剂纳米颗粒作为二次碳纳米管的生长位点,在所述垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管。

[0009] 进一步地,S1中,采用原子层沉积在垂直碳纳米管阵列内部沉积金属氧化物纳米颗粒。

[0010] 进一步地,S2中,采用退火还原法对所述金属氧化物纳米颗粒进行还原。

[0011] 进一步地,S1中,所述垂直碳纳米管阵列的高度为 $10\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ 。

[0012] 进一步地,S1中,沉积次数为400次-1000次。

[0013] 进一步地,S3中,采用化学气相沉积法在所述垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳

纳米管。

[0014] 进一步地,还包括对所述金属催化剂纳米颗粒进行预生长处理,处理时间为1-3min。

[0015] 进一步地,所述金属氧化物纳米颗粒为氧化镍、氧化钴或者四氧化三铁。

[0016] 按照本发明的另一方面,提供了一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料,所述热界面材料通过第一方面任意一项所述的制备方法制备得到。

[0017] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案,能够取得以下有益效果:

[0018] (1) 本发明通过直接在垂直碳纳米管阵列内部原位生长二次碳纳米管,使直碳纳米管阵列内部形成互联的内部结构,代替现有技术中垂直碳纳米管阵列内部的传统导热填料,二次碳纳米管热导率比传统导热填料高,且二次碳纳米管与垂直碳纳米管阵列均为全碳基材料,制备得到的也是全碳基的垂直碳纳米管阵列热界面材料,使得二次碳纳米管热膨胀系数与垂直碳纳米管阵列匹配,因此,能够较大程度提升垂直碳纳米管阵列的热传输性能,并且维持垂直碳纳米管阵列的低热膨胀系数,保持其热机械稳定性,充分利用了碳纳米管的优良性能。

[0019] (2) 相比传统导热填料的沉积多采用溅射法和电子束蒸发法,导致导热填料在阵列内部的渗透深度非常有限,阵列内部仍然存在大量空气间隙,并且会带来较大的物理接触热阻,进而降低导热填料的热传输性能,本发明采用原子层沉积和退火还原法,金属氧化物纳米颗粒与碳管表面形成共价键接触,能够降低接触热阻,同时保证形成的金属催化剂纳米颗粒在垂直碳纳米管阵列内部的深度沉积,能够大幅度减小阵列内部空气间隙,降低空气热阻,进一步提升垂直碳纳米管阵列的热传输性能。

[0020] (3) 作为优选,在设定的垂直碳纳米管阵列的高度范围内以及沉积次数范围内,可以避免出现垂直碳纳米管阵列蒸发现象,能够得到传输特性较好的热界面材料。

[0021] (4) 作为优选,采用化学气相沉积法在垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管,通过调整生长条件,更容易控制二次碳纳米管的生长速度。

[0022] (5) 作为优选,在设定的金属催化剂纳米颗粒预生长处理时间内,可以确保金属催化剂纳米颗粒能够形成适合碳纳米管生长的颗粒大小。

[0023] (6) 本发明的制备方法所采用的金属氧化物纳米颗粒来源广泛,方法制备简单,适用性强且成本较低。

[0024] 总而言之,本发明解决了现有导热填料热传输性能差、热膨胀系数与垂直碳纳米管阵列不匹配,填充方式深度不够的问题。

附图说明

[0025] 图1为本发明实施例制备互联结构的垂直碳纳米管阵列的流程示意图。

[0026] 图2为本发明实施例1制备的沉积了NiO纳米颗粒的垂直碳纳米管阵列的示意图。

[0027] 图3为本发明实施例1制备的沉积了Ni催化剂纳米颗粒的垂直碳纳米管阵列的示意图。

[0028] 图4为本发明实施例1生长二次碳纳米管后得到的互联结构的垂直碳纳米管阵列示意图。

[0029] 图5为本发明实施例1到的垂直碳纳米管阵列的SEM图。

[0030] 图6(a)、图6(b)分别为本发明实施例1中NiO纳米颗粒包裹的垂直碳纳米管阵列在还原前后的SEM图像。

[0031] 图7为本发明实施例1得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列内部形貌图。

[0032] 图8为本发明实施例2得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列内部形貌图。

[0033] 图9为本发明实施例3得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列内部形貌图。

[0034] 图10为本发明实施例4得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列内部形貌图。

[0035] 图11为电子器件热管理示意图。

[0036] 图12为本发明实施例1-4得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列与垂直碳纳米管阵列分别应用到电子器件热管理中时对应的电子器件的温度变化。

[0037] 在所有附图中,相同的附图标记用来表示相同的元件或者结构,其中:

[0038] 101-垂直碳纳米管阵列,102-NiO纳米颗粒,103-Ni纳米颗粒,104-二次碳纳米管。

具体实施方式

[0039] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0040] 如图1所示,本发明的通过二次碳纳米管互联的热界面材料制备方法,包括如下步骤:

[0041] S1、在垂直碳纳米管阵列101内部沉积金属氧化物纳米颗粒;

[0042] S2、对该金属氧化物纳米颗粒进行还原,形成金属催化剂纳米颗粒;

[0043] S3、将形成的金属催化剂纳米颗粒作为二次碳纳米管的生长位点,在垂直碳纳米管阵列内部生长二次碳纳米管104。

[0044] 作为优选,S1中,采用原子层沉积将金属氧化物纳米颗粒在垂直碳纳米管阵列内部进行深度沉积,为二次碳纳米管在阵列内部的深度生长奠定基础;S2中,通过退火还原法将金属氧化物纳米颗粒还原成金属纳米颗粒。

[0045] 金属氧化物纳米颗粒可以为氧化镍NiO、氧化钴CoO或者四氧化三铁 Fe_3O_4 ,本发明的实施例中优选为氧化镍NiO;S2中,通过退火还原法中对NiO纳米颗粒102进行还原,形成Ni纳米颗粒103。

[0046] 通过原子层沉积,金属氧化物纳米颗粒与碳管表面的-OH进行连接,形成共价键接触,可以减小S3中的二次碳纳米管与碳管表面的接触热阻,实验证明该接触热阻值比物理接触热阻值低两个数量级。同时,可以实现金属氧化物纳米颗粒在垂直碳纳米管阵列内部的深度均匀沉积,提升S3中的二次碳纳米管在阵列内部的填充深度。

[0047] S1中,通过原子层沉积将氧化镍NiO纳米颗粒在垂直碳纳米管阵列内部进行深度沉积包括:

[0048] 以镍源作为前驱体,以氧化剂作为反应源,在100℃-300℃的反应温度下,按照一定的脉冲序列将前驱体源和反应源先后交替通入原子层沉积设备与垂直碳纳米管阵列表面发生反应,在垂直碳纳米管阵列内部均匀沉积NiO纳米颗粒,通过控制前驱体源和反应源通入原子层沉积设备的次数,控制NiO纳米颗粒的含量。

[0049] 其中,镍源的热温度为 100°C - 115°C 。镍源可以是乙基二茂镍、 $\text{Ni}(\text{dmamb})_2$ 、Nickelocene、 $\text{Ni}(\text{EtCp})_2$,反应源可以是氧气 O_2 、臭氧 O_3 、水 H_2O 中的一种或多种,本发明的实施例中,优选镍源为乙基二茂镍,反应源为臭氧和水,将乙基二茂镍,臭氧和水交替通入原子层沉积设备中,依次与碳纳米管表面的-OH发生替换反应,最终得到与碳管表面共价键接触的NiO纳米颗粒。

[0050] S1中,垂直碳纳米管阵列的高度为 $10\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$;沉积次数为400次-1000次。

[0051] S2中,退火还原法所用的还原温度为 350°C - 450°C ,还原时间为0.5h-1h。在本发明的实施例中,将包裹着NiO纳米颗粒的垂直碳纳米管阵列放入管式炉中,通入氢气,在氢气的还原作用下,NiO与氢气发生反应生成Ni纳米颗粒,在还原温度为 350°C - 450°C ,还原时间为0.5h-1h条件下,最终得到的Ni纳米颗粒能够在垂直碳纳米管阵列内部深度沉积,并且与碳管表面是共价键接触,为二次碳纳米管的深度生长和共价键接触提供条件。

[0052] 其中,退火还原法所用设备可以是TCVD管式炉、PECVD管式炉中的任意一种。

[0053] S3中,采用化学气相沉积法,在垂直碳纳米管阵列内部原位生长二次碳纳米管。化学气相沉积法包括TCVD法、PECVD法、FCCVD法中的任意一种。在本发明的实施例中,将包裹着Ni纳米颗粒的垂直碳纳米管阵列放入化学气相沉积设备,生长所需的碳源可以是乙醇、乙炔等含碳有机物,生长温度在 600°C - 800°C 之间,达到生长温度后,碳原子会溶解在Ni催化剂中,直到饱和析出以正六边形的方式排列组合形成二次碳纳米管。

[0054] 采用化学气相沉积法在垂直碳纳米管阵列内部原位生长二次碳纳米管,二次碳纳米管的生长速度比较合适,通过调整生长条件,更容易控制二次碳纳米管的生长。

[0055] 作为优选,化学气相沉积法对金属催化剂纳米颗粒进行预生长处理时间为1-3min,以确保金属催化剂纳米颗粒能够形成适合碳纳米管生长的颗粒大小。

[0056] 按照本发明的另一方面,提供了一种通过二次碳纳米管互联的热界面材料,该热界面材料通过上述的方法制备得到。

[0057] 下面通过具体的实施例对本发明的方法进一步说明。

[0058] 实施例1

[0059] 首先,使用高度为 $10\mu\text{m}$ 、平均直径为20nm、相邻碳管平均间距为20nm的垂直碳纳米管阵列101作为原材料,利用原子层沉积设备,将加热到 100°C 的乙基二茂镍作为镍源、 O_3 和 H_2O 作为反应源,依次通入原子层沉积设备的反应腔内,反应腔温度为 250°C ,在阵列内部深度均匀沉积了1000次NiO纳米颗粒,最终得到被NiO纳米颗粒102均匀包裹的垂直碳纳米管阵列,如图2所示,NiO纳米颗粒在阵列内深度均匀沉积,与碳管表面通过-O-键实现共价键接触。

[0060] 然后,将NiO纳米颗粒包裹的垂直碳纳米管阵列放置到TCVD管式炉中进行退火还原,在其它实施例中,可以选择PECVD管式炉中进行退火还原,退火还原过程中,以氢气作为还原气体与NiO纳米颗粒发生反应生成Ni和 H_2O ,还原温度为 400°C ,还原时间为1h,最终得到被Ni纳米颗粒103均匀包裹的垂直碳纳米管阵列,如图3所示,Ni纳米颗粒在阵列内深度均匀沉积,同样与碳管表面通过-O-键实现共价键接触。

[0061] 最后,将Ni纳米颗粒包裹的垂直碳纳米管阵列放置到TCVD管式炉中,使用化学气相沉积法生长二次碳纳米管,管式炉中通入氢气和氮气作为载气,放置Ni纳米颗粒再次氧化及碳纳米管氧化蒸发,生长温度为 700°C ,达到生长温度后,先对Ni纳米颗粒进行预生长

处理,时间为3min,通入乙醇开始生长二次碳纳米管104,最终得到的被原位生长的二次碳纳米管107,填充的垂直碳纳米管阵列,如图4所示,二次碳纳米管从碳管表面生长出,与相邻碳管表面接触,彼此之间存在一定程度的弯曲缠绕,最终在竖直碳管间形成热传输通道,减小阵列内部的空气间隙,降低空气热阻以及与碳管表面的接触热阻,提升热量在垂直碳纳米管阵列内部的传输速率。

[0062] 其中,本实施例中,用到的垂直碳纳米管阵列的形貌图如图5所示,从图5中可以看出,垂直碳纳米管阵列的内部相邻碳管之间存在较大的空气间隙,这是阻碍热量在阵列内部传输的主要因素。制备得到的NiO纳米颗粒包裹的垂直碳纳米管阵列在还原前后的SEM图像如图6(a)和图6(b)所示,可以看出,包裹着NiO纳米颗粒的碳纳米管在还原前后碳纳米管没有受到破坏,碳纳米管形貌维持较好。制备得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列(热界面材料)内部形貌如图7所示。将本实施例制备得到的热界面材料以及垂直碳纳米管阵列应用到如图11所示的器件热管理系统中,检测电子器件的温度随时间的变化,当电子器件加热6分钟后,两个样品对应的电子器件温度上升的图像如图12所示,可以看出,以制备得到的二次碳纳米管填充的垂直碳纳米管阵列作为热界面材料时,电子器件温度从 $\sim 31^{\circ}\text{C}$ 上升到 $\sim 80^{\circ}\text{C}$,而直接采用垂直碳纳米管阵列作为热界面材料时,电子器件温度从 $\sim 31^{\circ}\text{C}$ 上升到 $\sim 85^{\circ}\text{C}$,说明本发明实施例制备得到的热界面材料的热传输性能优于垂直碳纳米管阵列,反应了二次碳纳米管在垂直碳纳米管阵列内部填充能够提升垂直碳纳米管阵列热传输性能。

[0063] 同时,在本发明的实施例1中,还检测了沉积了1000次NiO纳米颗粒的垂直碳纳米管底部和顶部的Ni元素和O元素的含量以及还原后的Ni元素和O元素的含量,如下表1所示,可以发现,还原前垂直碳纳米管底部和顶部的Ni元素的含量与还原后垂直碳纳米管底部和顶部的Ni元素的含量相近,说明原子层沉积能够实现NiO纳米颗粒在阵列内部的深度均匀沉积,且不会破坏碳纳米管的形貌。

[0064] 表1还原前后垂直碳纳米管底部和顶部的Ni元素的含量占比

样品	元素	相对质量占比 (wt%)	相对原子质量占比 (at%)
[0065] 还原前 样品顶部	C	35.82	57.08
	O	25.18	30.83
	Ni	38.77	12.64
	Si	0.23	0.16
[0065] 还原前 样品底部	C	31.20	41.27
	O	18.94	33.38
	Ni	31.10	11.27
	Si	18.76	14.13
还原后 样品顶部	C	49.91	78.01
	O	4.88	5.73
	Ni	40.04	12.81
	Si	5.17	3.45

[0066] 实施例2

[0067] 与实施例1不同的是,本实施例中,NiO的沉积次数为400次,最终得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列内部形貌图如图8所示。将本实施例制备得到的结界面材料以及垂直碳纳米管阵列应用到如图11所示的器件热管理系统中,在相同的实验条件下,两个样品对应的电子器件温度上升的图像如图12所示,可以看出,以制备得到的二次碳纳米管填充的垂直碳纳米管阵列作为热界面材料时,电子器件温度从 $\sim 31^{\circ}\text{C}$ 上升到 $\sim 78^{\circ}\text{C}$ 。

[0068] 实施例3

[0069] 与实施例1不同的是,本实施例中,垂直碳纳米管阵列的高度为 $20\mu\text{m}$,最终得到的样品内部的二次碳纳米管的填充形貌如图9所示。将本实施例制备得到的结界面材料以及垂直碳纳米管阵列应用到如图11所示的器件热管理系统中,在相同的实验条件下,两个样品对应的电子器件温度上升的图像如图12所示,可以看出,以制备得到的二次碳纳米管填充的垂直碳纳米管阵列作为热界面材料时,电子器件温度从 $\sim 31^{\circ}\text{C}$ 上升到 $\sim 77^{\circ}\text{C}$ 。

[0070] 实施例4

[0071] 与实施例1不同的是,本实施例中,垂直碳纳米管阵列的高度为 $40\mu\text{m}$,最终得到的样品内部的二次碳纳米管的填充形貌如图10所示。将本实施例制备得到的结界面材料以及垂直碳纳米管阵列应用到如图11所示的器件热管理系统中,在相同的实验条件下,两个样品对应的电子器件温度上升的图像如图12所示,可以看出,以制备得到的二次碳纳米管填充的垂直碳纳米管阵列作为热界面材料时,电子器件温度从 $\sim 31^{\circ}\text{C}$ 上升到 $\sim 82^{\circ}\text{C}$ 。

[0072] 实施例5

[0073] 与实施例1不同的是,本实施例中,垂直碳纳米管阵列的高度为 $50\mu\text{m}$,通过实验发现,制备得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列对应的电子器件上升的温度要低于垂直碳纳

米管阵列对应的电子器件上升的温度。

[0074] 实施例6

[0075] 与实施例1不同的是,本实施例中,NiO的沉积次数为650次,通过实验发现,制备得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列对应的电子器件上升的温度要低于垂直碳纳米管阵列对应的电子器件上升的温度。

[0076] 实施例7-实施例8

[0077] 与实施例1不同的是,实施例7-8中,Ni纳米颗粒进行预生长时间分别为1min、2min,通过实验发现,制备得到的内部互联的垂直碳纳米管阵列对应的电子器件上升的温度要低于垂直碳纳米管阵列对应的电子器件上升的温度。

[0078] 对比例1-2

[0079] 与实施例1不同的是,本对比例1-2中,垂直碳纳米管阵列的高度为80 μm 、100 μm ,通过实验发现,垂直碳纳米管出现了蒸发,最终仅剩碳和镍的化合物。

[0080] 对比例3-4

[0081] 与实施例1不同的是,本对比例3-4中,Ni纳米颗粒进行预生长时间分别为5min、7min,通过实验发现,与对比例1-2相同,垂直碳纳米管出现了蒸发,最终仅剩碳和镍的化合物。

[0082] 并且,通过上述实施例1-8,可以发现,阵列高度相同时,在设定的沉积次数范围内,NiO沉积次数越多,二次碳纳米管相对占比也越高,作为热界面材料时,传输特性优于垂直碳纳米管。其中,对比实施例1和实施例2中最终的形貌图,可以发现实施例1中阵列内部的空气间隙变小,二次碳纳米管占比明显增多,但实施例1中电子器件温度略高于实施例2,这是由于实施例1中的接触热阻大于实施例2中的接触热阻导致的,但整体上实施例1的热传输效果优于垂直碳纳米管阵列。

[0083] 在NiO沉积次数相同时,在设定的垂直碳纳米管阵列高度范围内,垂直碳纳米管阵列高度越低,二次碳纳米管相对占比越高,作为热界面材料时,传输特性优于垂直碳纳米管。

[0084] 综上所述,本发明的方法通过在垂直碳纳米管阵列内部原位生长二次碳纳米管以提升垂直碳纳米管阵列热传输性能,该方法能够实现高热导率、低热膨胀系数的一维碳纳米管在垂直碳纳米管阵列内部的填充,以此来最大限度地提升垂直碳纳米管阵列地热传输性能,同时又能保证垂直碳纳米管阵列较低地热膨胀系数。通过二次碳纳米管的填充,电子器件产生地热量可以通过二次碳纳米管快速传输到散热器中,不会累积在垂直碳纳米管阵列内部,能够有效降低电子器件的工作温度。

[0085] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

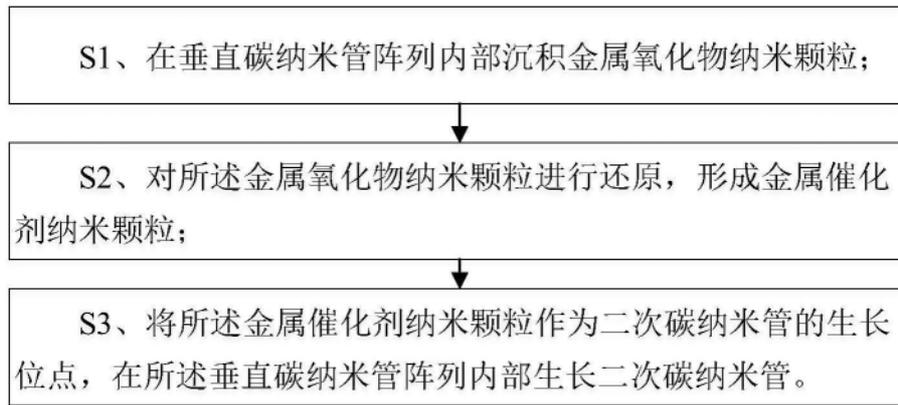


图1

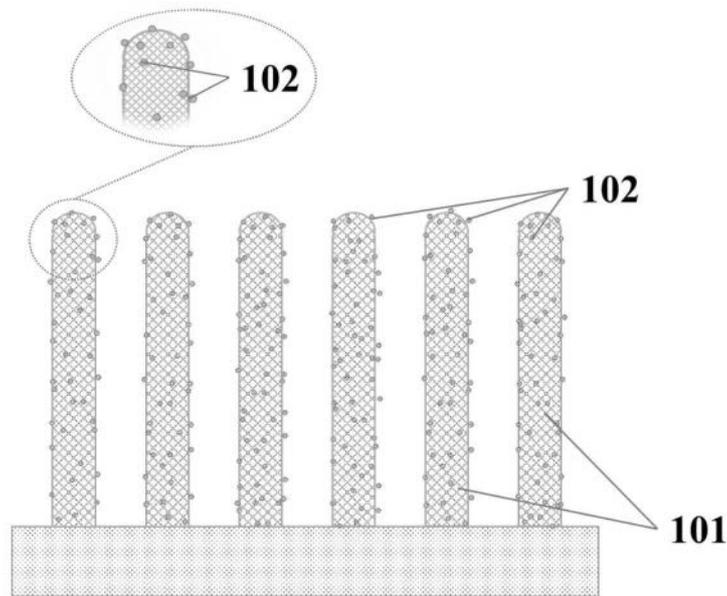


图2

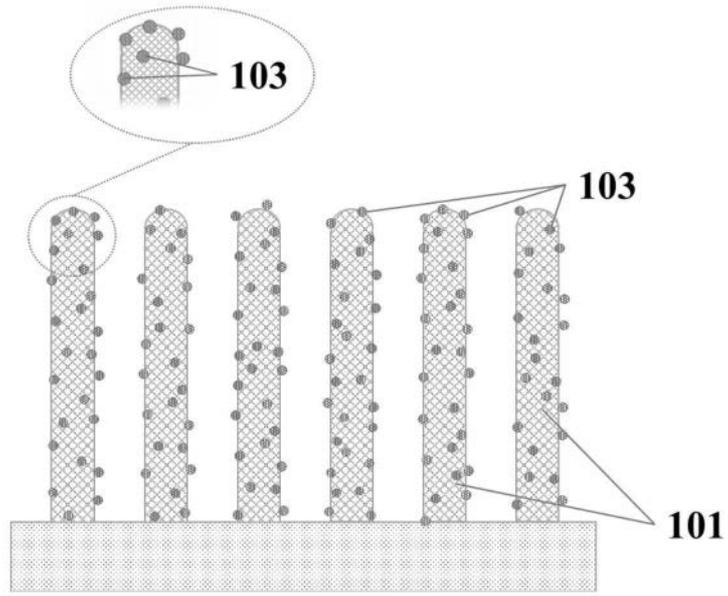


图3

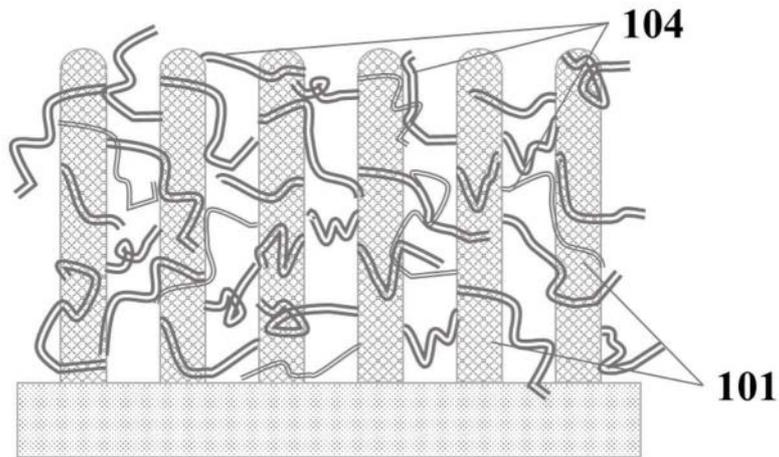


图4

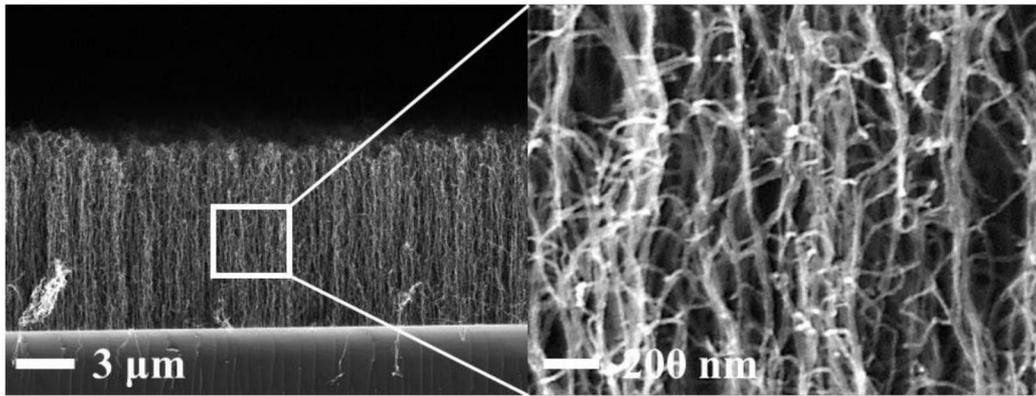


图5

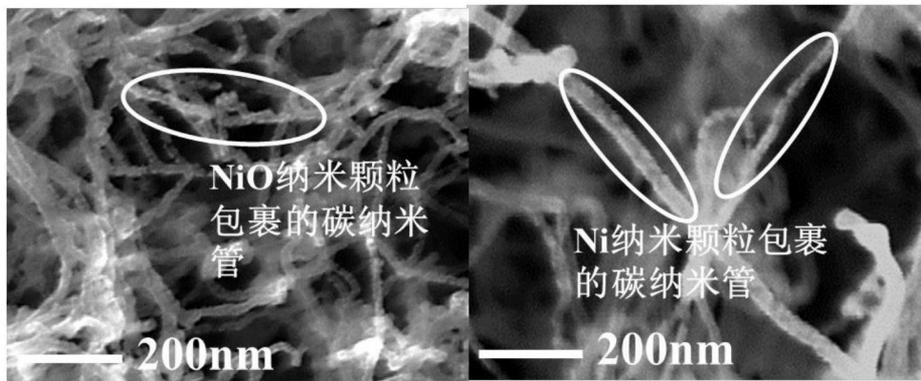


图 6 (a)

图 6 (b)

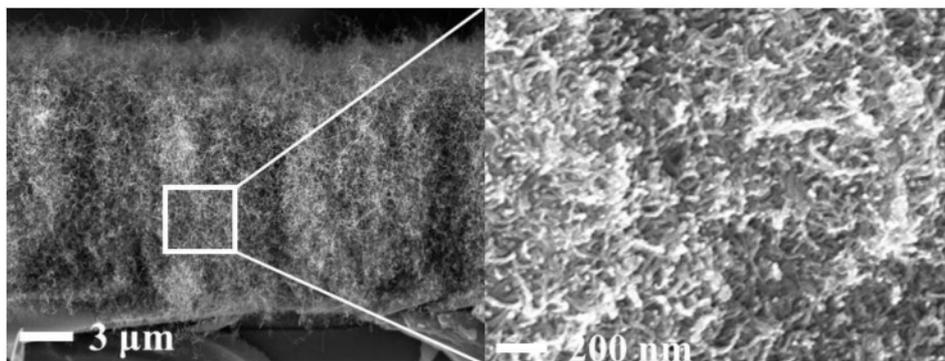


图7

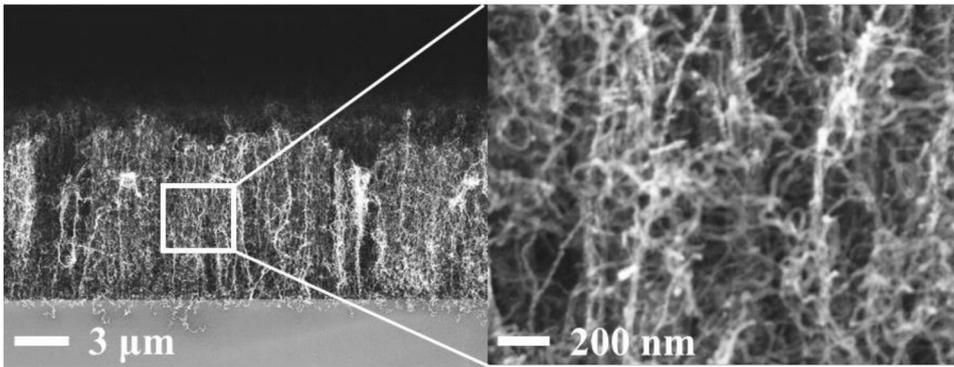


图8

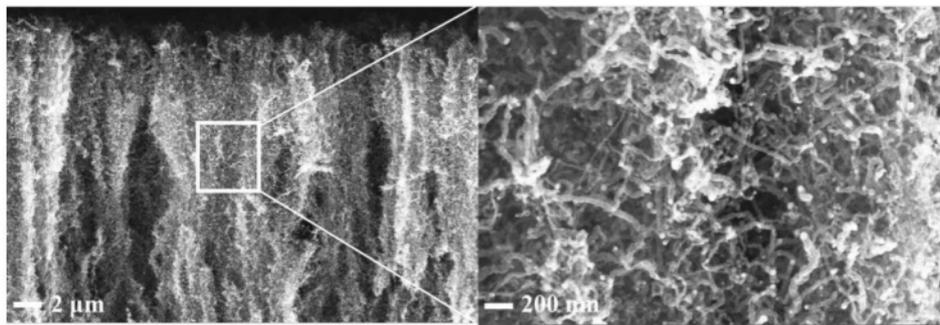


图9

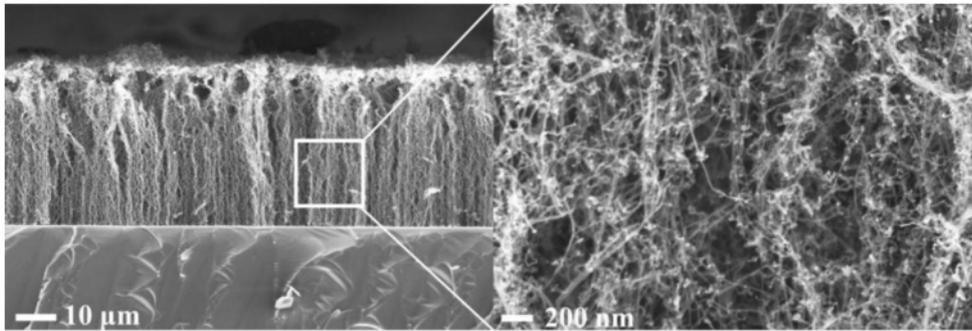


图10

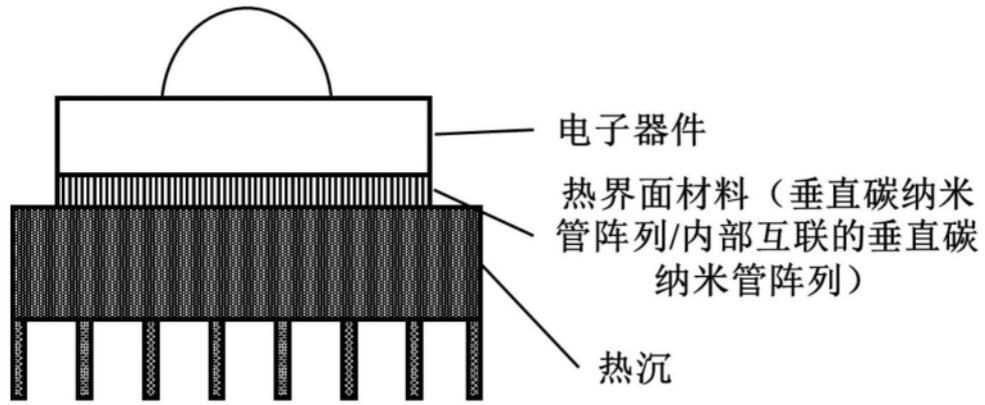


图11

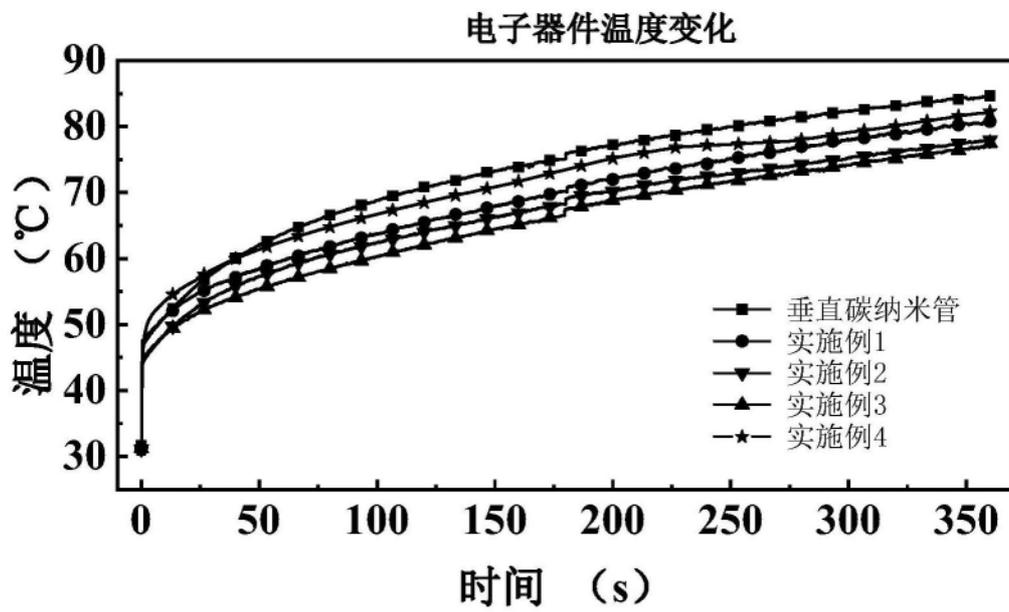


图12