(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101093870 B
(45)授权公告日 2010.11.03

(21)申请号 200710103943.7

(22)申请日 2007.05.15

(30)优先权数据
56373/06 2006.06.22 KR

(73)专利权人 三星电机株式会社
地址 韩国京畿道
专利权人 高丽大学校产学协力团

(72)发明人 成泰连 李琯熙 林东晢

(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所 11105
代理人 张波

(51)Int.Cl.
H01L 33/00(2006.01)

(56)对比文件
CN 1423842 A,2003.06.11, 全文.
US 2003/0059972 A1,2003.03.27, 全文.

审查员 刘斌

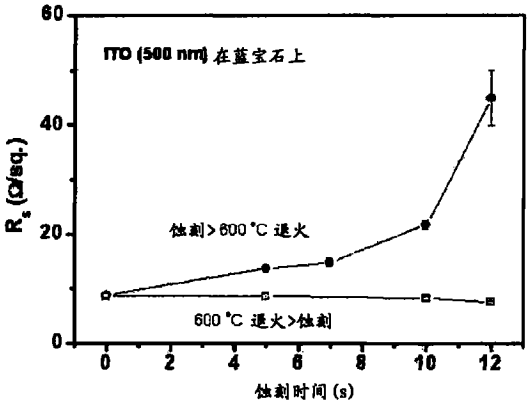
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 9 页

(54)发明名称

顶部发射氮基发光器件及其制造方法

(57)摘要

本发明提供了顶部发射N基发光器件及其制造方法。所述N基发光器件包括在衬底上顺序叠置的n型覆层、有源层、p型覆层和透明导电薄。所述透明导电薄膜具有通过湿法蚀刻然后退火且没有使用掩模而被纳米级图案化的表面，以改善光提取率。通过应用具有使用湿法蚀刻然后退火而被图案化的表面的透明导电薄膜而使光提取率最大化，能够制备高亮度发光器件。



CN 101093870 B

1. 一种 N 基发光器件的制造方法，所述方法包括如下操作：

a、在发光结构的 p 型覆层上形成透明导电薄膜，在所述发光结构中 n 型覆层、有源层和 p 型覆层顺序叠置在衬底上；

b、湿法蚀刻所述透明导电薄膜；以及

c、退火经湿法蚀刻的透明导电薄膜。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，还包括在操作 a 之前，在所述 p 型覆层上形成厚度为 0.1 至 50nm 的金属薄膜。

3. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述透明导电薄膜由透明导电氧化物形成，所述透明导电氧化物是从 In、Sn、Zn、Ga、Ce、Cd、Mg、Be、Ag、Mo、V、Cu、Ir、Rh、Ru、W、Co、Ni、Mn、Al 和 La 所构成的组中选取的至少一种与 O 的化合物。

4. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述透明导电薄膜形成至 10 至 700nm 范围内的厚度。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其中利用从缓冲氧化物蚀刻剂 BOE、氢氟酸、盐酸、硝酸、磷酸、硫酸、氢氧化钾、草酸、酒石酸、蚁酸、醋酸和乙醇酸所构成的组中选取的未稀释溶液、所述未稀释溶液的混合物、或者在去离子水中稀释的所述未稀释溶液的混合物或所述未稀释溶液的稀释溶液，来进行所述透明导电薄膜的湿法蚀刻。

6. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述湿法蚀刻所述透明导电薄膜在室温至 300℃的温度下进行 0.1 秒至 1 小时。

7. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述退火经湿法蚀刻的透明导电薄膜在室温至 900℃范围内的温度下进行 10 秒至 3 小时。

8. 根据权利要求 7 所述的方法，其中所述退火经湿法蚀刻的透明导电薄膜在含有氮气、氩气、氦气、氧气、氢气和空气中至少一种的环境气体中或真空中进行。

9. 根据权利要求 2 所述的方法，其中所述金属薄膜由从 Ni、Co、Cu、Pd、Pt、Ru、Ir、Au、Ag、Cr、Rh、In、Sn、Mg、Zn、Be、Sr 和 Ba 所构成的组中选取的一种、或者由两种或更多种所述金属构成的合金或固溶体来形成。

顶部发射氮基发光器件及其制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种顶部发射 N 基发光器件及其制造方法，更具体而言，涉及一种由于含有纳米级图案化的透明导电薄膜而具有提高的光提取率(light extraction rate)的顶部发射 N 基发光器件及其制造方法，所述纳米级图案化的透明导电薄膜通过湿法蚀刻然后对透明导电薄膜的表面退火来制备而没有使用掩模。

背景技术

[0002] 当利用比如 GaN 基化合物半导体的 N 基化合物半导体来形成发光器件时，需要在半导体和电极之间形成高质量的欧姆接触的工艺。然而，尽管近来已经进行了对于利用 N 基化合物半导体的发光器件的许多研究，但由于 p-GaN 具有低载流子浓度、高薄层电阻和低电导率，所以不能容易地得到高质量欧姆接触。因此，为了提供到发光器件中的良好电流传播，本质上更加需要利用金属电极的 p-GaN 的高质量欧姆接触。特别是，由于在顶部发射发光器件中产生的光通过欧姆电极发出，所以需要具有低接触电阻率 (specific contact resistance) 和高光透射率的高质量欧姆接触。

[0003] 通常使用其中镍和金叠置在 p 型覆层 (clad layer) 上的结构来作为顶部发射发光器件中的欧姆接触结构。已知在氧或空气气氛中退火的 Ni/Au 欧姆接触结构形成具有约 10^{-3} 至 $10^{-4}cm^2$ 的低接触电阻率的半透明欧姆接触层。然而，由于常规的 Ni/Au 欧姆接触层在层的厚度为 450nm 时具有约 75％的低光透射率而导致低的光提取率，所以常规的 Ni/Au 欧姆接触层不适于用于大容量和高亮度发光器件中。因此，为了改善这样的顶部发射发光器件的有限的输出功率，已经对利用透明导电氧化物比如 ITO 进行了研究，所述透明导电氧化物比用作常规 p 欧姆接触层的半透明 Ni/Au 结构具有更优异的光透射率。同时，已经通过应用 Ni/ITO 欧姆接触层发展了具有改善的约 1.3 倍的光输出功率的顶部发射发光器件，所述 Ni/ITO 欧姆接触层具有 86.6％的高的光透射率，这比在层厚度为 450nm 时约 71.1％的常规 Ni/Au 欧姆接触层的光透射率更高。

[0004] 近来，已经提出了电极表面织构化 (texturing) 从而使发光器件的光提取率最大化。例如，已经报道了通过利用 NiO/ITO 结构形成 p 型 GaN 欧姆接触层、利用常规光刻和干法蚀刻构图具有微米级孔的 ITO 电极并将图案化的 ITO 电极应用于发光器件，而使发光器件改善了约 16％的光输出功率。此外，在美国专利申请 No.2003/0062530A1 中公开了通过利用 He-Cd 激光、Ar 激光等的电子束曝光和干涉测量曝光来形成一维条形图案的方法。

[0005] 同时，在美国专利申请 No.2004/0041164A1 中公开了通过利用光致抗蚀剂掩模的干法蚀刻和反应性离子蚀刻 (RIE) 在发光器件的表面上应用由光提取元件 (LEE)、分散层 (disperser layer) 等构成的光提取结构，来改善发光器件的外部量子效率的方法。

[0006] 然而，电极表面织构化和构图需要包括掩模和干法蚀刻的附加工艺，由此使这些方法对于制造发光器件并非是有效的。特别是，在制造 N 基发光器件时的干法蚀刻可能损坏电极表面。此外，由于通过这些方法制造的发光器件具有微米尺寸的孔图案，所以不能使发出波长在 400 至 500nm 范围内的光的发光器件的光提取率最大化。

发明内容

[0007] 本发明提供了一种包括电极结构的N基发光器件及其制造方法，所述电极结构通过利用湿法蚀刻和退火而不使用掩模来纳米级构图由透明导电薄膜构成的p型欧姆电极以在界面处诱发发光器件中产生的光的漫反射(diffused reflection)，而具有增大的光提取率。

[0008] 根据本发明的一个方面，提供了一种N基发光器件的制造方法，所述方法包括：

[0009] (a)在发光结构的p型覆层上形成透明导电薄膜，在所述发光结构中n型覆层、有源层和p型覆层顺序叠置在衬底上；

[0010] (b)湿法蚀刻所述透明导电薄膜；以及

[0011] (c)退火经湿法蚀刻的透明导电薄膜。

[0012] 所述透明导电薄膜可以由透明导电氧化物形成，所述透明导电氧化物是从In、Sn、Zn、Ga、Ce、Cd、Mg、Be、Ag、Mo、V、Cu、Ir、Rh、Ru、W、Co、Ni、Mn、Al和La所构成的组中选取的至少一种的氧化物。

[0013] 为了改善所述透明导电薄膜的导电特性，可以将掺杂剂添加到所述透明导电氧化物，并且所述掺杂剂可以包括周期表所列的金属中的至少一种。

[0014] 所述透明导电薄膜可以利用电子束蒸镀器、溅镀、等离子体激光沉积(PLD)、双重型热蒸镀器、物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)中的一种来形成。所述透明导电薄膜可以形成至10至1000nm范围内的厚度。

[0015] 所述N基发光器件的制造方法还可以包括在形成所述透明导电薄膜之前，在所述p型覆层上形成厚度为0.1至50nm的金属薄膜。所述金属薄膜可以由从Ni、Co、Cu、Pd、Pt、Ru、Ir、Au、Ag、Cr、Rh、In、Sn、Mg、Zn、Be、Sr和Ba所构成的组中选取的一种金属、或者由两种或更多种所述金属构成的合金或固溶体来形成。

[0016] 可以利用从缓冲氧化物蚀刻剂(BOE)、氢氟酸(HF)、盐酸(HCl)、硝酸(HNO_3)、磷酸(H_3PO_4)、硫酸(H_2SO_4)、氢氧化钾(KOH)、草酸、酒石酸、蚁酸、醋酸和乙醇酸所构成的组中选取的未稀释溶液、所述未稀释溶液的混合物、或者在去离子水中稀释的所述未稀释溶液的混合物或所述未稀释溶液的稀释溶液，来进行所述透明导电薄膜的湿法蚀刻。可以在室温至300℃的温度下湿法蚀刻所述透明导电薄膜0.1秒至1小时。

[0017] 可以在含有氮气(N_2)、氩气(Ar)、氦气(He)、氧气(O_2)、氢气(H_2)和空气中至少一种的环境气体中或真空中，在室温至900℃范围内的温度下对经湿法蚀刻的透明导电薄膜退火10秒至3小时。

附图说明

[0018] 通过参照附图对其示例性实施例的详细描述，本发明的以上和其他特征及优点将变得更加明显，其中：

[0019] 图1是根据本发明第一实施例的顶部发射发光器件的示意性剖面图；

[0020] 图2是根据本发明第二实施例的顶部发射发光器件的示意性剖面图；

[0021] 图3是曲线图，示出了根据本发明一实施例利用湿法蚀刻然后退火的一种构图方法制造的ITO电极以及根据常规比较实例利用退火然后湿法蚀刻的另一构图方法制造的

ITO 电极的薄层电阻；

[0022] 图 4A 和 4B 是根据一实施例和常规比较实例利用构图方法制造的 ITO 电极表面的原子力显微镜 (AFM) 图像；

[0023] 图 5A 和 5B 是曲线图，示出了根据本发明一实施例的包括利用湿法蚀刻然后退火而构图的 p 型电极的近紫外线发光器件的电特性；

[0024] 图 6 是根据本发明一实施例的包括通过湿法蚀刻然后退火而构图的 p 型电极的近紫外线发光器件的光输出功率 - 电流 (L-I) 曲线图；

[0025] 图 7A 至 7C 是根据本发明一实施例的通过湿法蚀刻然后退火而构图的近紫外线发光器件的 p 型电极表面的扫描电子显微镜 (SEM) 图像；

[0026] 图 8A 至 8C 是根据本发明一实施例的通过湿法蚀刻然后退火而构图的近紫外线发光器件的 p 型电极表面的原子力显微镜 (AFM) 图像；以及

[0027] 图 9A 至 9C 是根据本发明一实施例的近紫外线发光器件的湿法蚀刻 p 型电极的表面的原子力显微镜 (AFM) 图像。

具体实施方式

[0028] 以下，将参照附图更充分地描述本发明，附图中示出了本发明的示例性实施例。然而，本发明可以以多种不同形式实施，而不应解释为仅限于在此描述的实施例；而且，提供这些实施例是为了使本公开透彻而完全，并将本发明的理念充分告知本领域技术人员。

[0029] 图 1 是根据本发明第一实施例的顶部发射发光器件的示意性剖面图。

[0030] 参照图 1，根据本发明第一实施例的 N 基发光器件包括顺序叠置的衬底 10、缓冲层 20、n 型覆层 (clad layer)30、有源层 40、p 型覆层 50 以及表面图案化的透明导电薄膜 60。该 N 基发光器件还包括 n 电极焊盘 90 和 p 电极焊盘 80。

[0031] N 基发光器件主要分为包括衬底 10、缓冲层 20、n 型覆层 30、有源层 40 和 p 型覆层 50 的发光结构以及包括形成在 p 型覆层 50 上的透明导电薄膜 60 的 p 欧姆电极结构。

[0032] 衬底 10 可以由蓝宝石 (Al_2O_3)、碳化硅 (SiC)、Si 和砷化镓 (GaAs) 之一形成。

[0033] 可以不形成缓冲层 20。

[0034] 从缓冲层 20 上至 p 型覆层 50 的每一层包括从 III 族 N 基化合物中选取的化合物作为其主要成分，所述 III 族 N 基化合物以化学式 $Al_xIn_yGa_zN$($0 \leqslant x < 1$, $0 \leqslant y < 1$, $0 < z \leqslant 1$, 和 $0 < x+y+z \leqslant 1$) 为代表，并且 n 型覆层 30 和 p 型覆层 50 除了所述化合物之外含有适当的掺杂剂。

[0035] 有源层 40 可以具有各种已知的结构，比如单层或多量子阱 (MQW) 层。

[0036] 例如，当每一层主要由 GaN 基化合物形成时，缓冲层 20 由 GaN 形成，n 型覆层 30 除了 GaN 之外还含有比如 Si、Ge、Se 或 Te 的 n 型掺杂剂，有源层 40 具有 InGaN/GaN MQW 或 AlGaN/GaN MQW 结构，p 型覆层 50 除了 GaN 之外还含有比如 Mg、Zn、Ca、Sr 或 Be 的 p 型掺杂剂。

[0037] 在 n 型覆层 30 与 n 电极焊盘 90 之间可以插入 n 欧姆接触层（未示出），并且 n 欧姆接触层可具有各种已知的结构，比如由 Ti/Al 双层构成的结构。

[0038] p 电极焊盘 80 可以由 Ni/Au、W/Au、Pt/Au、Pd/Au 或 Ag/Au 双层构成。

[0039] 可以利用已知方法中的一种来形成每一层，比如电子束蒸镀器、物理气相沉积

(PVD)、化学气相沉积 (CVD)、等离子体激光沉积 (PLD)、双重型热蒸镀器和溅镀。

[0040] 可以通过沉积透明导电薄膜、湿法蚀刻该透明导电薄膜然后退火经湿法蚀刻的透明导电薄膜来形成表面图案化的透明导电薄膜 60。该表面图案化的透明导电薄膜 60 可具有 10 至 1000nm 的厚度。

[0041] 透明导电薄膜可以由透明导电氧化物形成，所述透明导电氧化物是从 In、Sn、Zn、Ga、Ce、Cd、Mg、Be、Ag、Mo、V、Cu、Ir、Rh、Ru、W、Co、Ni、Mn、Al 和 La 所构成的组中选取的至少一种的氧化物。

[0042] 然后，可以利用从缓冲氧化物蚀刻剂 (BOE)、氢氟酸 (HF)、盐酸 (HCl)、硝酸 (HNO_3)、磷酸 (H_3PO_4)、硫酸 (H_2SO_4)、氢氧化钾 (KOH)、草酸、酒石酸、蚁酸、醋酸和乙醇酸构成的组中中选取的未稀释溶液、未稀释溶液的混合物、或者在去离子水中稀释的未稀释溶液的混合物或未稀释溶液的稀释溶液，来湿法蚀刻沉积的透明导电薄膜。可以在室温至 300℃的温度下湿法蚀刻透明导电薄膜 0.1 秒至 1 小时。

[0043] 可以在室温至 900℃的温度下对经湿法蚀刻的透明导电薄膜退火 10 秒至 3 小时，以形成表面图案化的透明导电薄膜 60。可以在含有氮 (N_2)、氩 (Ar)、氦 (He)、氧 (O_2)、氢 (H_2) 和空气中至少一种的气体气氛或者真空中进行退火。

[0044] 图 2 是根据本发明第二实施例的顶部发射发光器件的示意性剖面图。

[0045] 为了改善表面图案化的透明导电薄膜 60 和 p 型覆层 50 之间的欧姆接触，根据第二实施例的顶部发射发光器件包括透明导电薄膜 60 和 p 型覆层 50 之间的金属薄膜 70。金属薄膜 70 可以具有 0.1 至 50nm 的厚度。

[0046] 金属薄膜具有高导电性和高功函数。金属薄膜可以由能够形成 Ga 基化合物的导电材料形成，比如从 Ni、Co、Cu、Pd、Pt、Ru、Ir、Au、Ag、Cr、Rh、In、Sn、Mg、Zn、Be、Sr 和 Ba 所构成的组中选取的一种、或者由两种或更多种所述金属构成的合金或固溶体。

[0047] 有机金属薄膜 70 具有高导电性，所以当金属薄膜 70 与表面图案化的透明导电薄膜 60 接触时，通过引起改善的电流传播而可以减小 p 欧姆电极结构的接触电阻率。

[0048] 图 3 是曲线图，示出了根据本发明一实施例利用湿法蚀刻和退火的一种构图方法制造的 ITO 电极以及根据常规比较实例利用退火和湿法蚀刻的另一构图方法制造的 ITO 电极的薄层电阻。

[0049] 更具体而言，根据本实施例，利用电子束蒸镀器在蓝宝石衬底上沉积 ITO 电极至 500nm 的厚度，利用其中 BOE 与去离子水的比率为 1 ： 10 的稀释 BOE 溶液蚀刻 ITO 电极，并在 600℃下对经蚀刻的 ITO 退火 3 分钟，从而构图 ITO 电极的表面。然后，为了比较，根据常规的比较实例，利用电子束蒸镀器在蓝宝石衬底上沉积 ITO 电极至 500nm 的厚度，在 600℃下对 ITO 电极退火 3 分钟，然后利用其中 BOE 与去离子水的比率为 1 ： 10 的稀释 BOE 溶液蚀刻经退火的 ITO 电极。

[0050] 当根据本实施例蚀刻 ITO 电极的表面然后退火时，ITO 电极的薄层电阻随着蚀刻时间连续增大。另一方面，当退火 ITO 电极的表面然后蚀刻时，ITO 电极的薄层电阻保持恒定而与蚀刻时间无关。

[0051] 图 4A 和 4B 是根据图 3 所示实施例利用构图方法制造的 ITO 电极表面的原子力显微镜 (AFM) 图像。如图 4A 中所示出的，利用稀释的 BOE 溶液蚀刻并在 600℃下退火的 ITO 电极的表面被粗糙地图案化。另一方面，如图 4B 所示，在 600℃下退火并利用稀释的 BOE 溶

液蚀刻的 ITO 电极的表面没有被粗糙地图案化。作为利用 AFM 测量均方根粗糙度以分析粗糙度的结果，在根据本实施例的被蚀刻然后退火的 ITO 电极表面的 81.6nm 的均方根粗糙度与根据常规比较实例的被退火然后蚀刻的 ITO 电极表面的 4.4nm 的均方根粗糙度之间存在很大差异。因此，与退火 - 蚀刻方法相比，湿法蚀刻 - 退火的表面构图方法更加有效，因为 ITO 电极在退火前具有非晶表面而在退火后具有多晶表面，因此 ITO 电极的表面在退火前和退火后被不同地蚀刻。

[0052] 图 5A 和 5B 是曲线图，示出了根据本发明一实施例的包括在 p 型覆层 50 上的表面图案化 ITO 透明导电薄膜 60 的近紫外线 InGaN/GaN MQW 发光器件的电特性。利用 Ag 沉积金属薄膜 70 至 3nm 的厚度以改善 ITO 透明导电薄膜 60 与 p 型覆层 50 之间的欧姆接触，并通过利用稀释的 BOE 溶液蚀刻然后在 600℃下退火来形成表面图案化的 ITO 透明导电薄膜 60。图 5A 示出了包括表面图案化的 ITO 透明导电薄膜的发光器件对于各种蚀刻时间的电流 - 电压特性。在 20mA 处，对于 0 秒、7 秒、10 秒和 12 秒的蚀刻时间，发光器件的工作电压分别为 3.57V、3.61V、3.70V 和 3.83V。图 5B 示出了在 -10V 处的发光器件的反向电流，并且反向电流被保持而与蚀刻时间无关。因此，包括利用湿法蚀刻和退火的表面图案化的 ITO 电极的发光器件能够通过解决比如反向电流的电特性的劣化而具有改善的电特性，所述电特性的劣化由于等离子体的破坏而发生在包括干法蚀刻的 ITO 的常规发光器件中。

[0053] 图 6 是图 5A 和 5B 所示的发光器件的光输出功率 - 电流 (L-I) 曲线。参照图 6，与未被表面图案化（蚀刻 0 秒）的发光器件相比，包括表面图案化的 ITO 电极的发光器件在 20mA 处具有极佳的光输出功率。例如，含有通过湿法蚀刻 7 秒然后退火而被图案化的 ITO 电极的发光器件具有约 32％的改善光输出功率，而含有通过湿法蚀刻 12 秒然后退火而被图案化的 ITO 电极的发光器件具有约 19％的改善光输出功率。

[0054] 图 7A 至 7C 是分别通过湿法蚀刻 0 秒、7 秒和 12 秒然后在 600℃下退火而被图案化的 ITO 电极表面的扫描电子显微镜 (SEM) 图像。与图 7A 所示的未被蚀刻的 ITO 电极的表面相比，图 7B 和 7C 所示的 ITO 电极的表面粗糙。特别是，图 7B 所示的通过蚀刻 7 秒然后在 600℃下退火而被图案化的表面具有直径在 250 至 550nm 范围内的细微颗粒。由于表面图案化的结构的尺寸与根据本发明的发光器件所产生的光的波长 (405nm) 类似，所以发光器件中产生的光能够有效地被提取。因此，如图 6 所示，发光器件能够具有约 32％的高的光输出功率。同时，通过蚀刻 12 秒然后在 600℃下退火而被图案化的表面具有尺寸在约 500 至 1000nm 范围内的过大的颗粒尺寸，并且如图 7C 所示，颗粒聚结。在这种情况下，由于颗粒尺寸略微大于所产生的光 405nm 的波长，所以在发光器件中产生的光更有可能反射到发光器件中而不是被提取。因此，如图 6 所示，发光器件会具有约 19％的相对低的光输出功率。这种低的光输出功率与具有利用微米级图案化的电极的发光器件的小于 20％的相对低的光输出功率类似。

[0055] 图 8A 至 8C 是图 7A 至 7C 所示的发光器件表面的原子力显微镜 (AFM) 图像。通过蚀刻 0 秒、7 秒和 12 秒然后在 600℃下退火而被图案化的发光器件的表面分别具有 4.1nm、74.3nm 和 142nm 的粗糙度。

[0056] 图 9A 至 9C 是通过湿法蚀刻 0 秒、7 秒和 12 秒而被图案化的发光器件表面的原子力显微镜 (AFM) 图像。通过湿法蚀刻 0 秒、7 秒和 12 秒而被图案化的发光器件的表面分别具有 4nm、43.9nm 和 90.6nm 的粗糙度。所述结果表明 ITO 电极在退火前和退火后具有不同

的表面。例如，在对被蚀刻 7 秒之后具有约 43.9nm 的粗糙度的表面在 600℃下进行退火时，样品的表面粗糙度增大至约 74.3nm，如图 8B 所示。也就是说，表面上的相邻细微颗粒通过退火而聚结，由此能够增大表面的颗粒尺寸。然而，图案化表面的相对粗糙度主要由退火前的蚀刻时间决定，即使图案化表面的粗糙度通过退火而略微增大。因此，蚀刻时间需要被控制，以用于形成根据本发明的含有图案化表面的透明导电薄膜。

[0057] 根据本发明的 N 基发光器件的制造方法，能够制备透明导电薄膜，该透明导电薄膜通过湿法蚀刻然后退火被纳米级图案化而没有使用掩模，更具体而言，能够制备具有最大化的光提取率的顶部发射 N 基发光器件，其中在该器件中产生的光通过应用纳米级图案化的透明导电薄膜作为 p 型电极而发出。因此，能够改善 N 基发光器件的光学特性。

[0058] 尽管已经参考其示例性实施例具体表示并描述了本发明，但本领域普通技术人员应理解的是，在不偏离由所附权利要求限定的本发明的精神和范围的前提下，可以对本发明进行形式和细节上的各种变化。

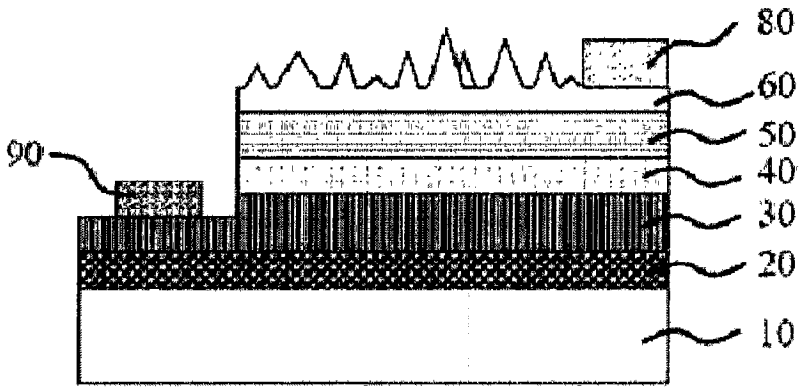


图 1

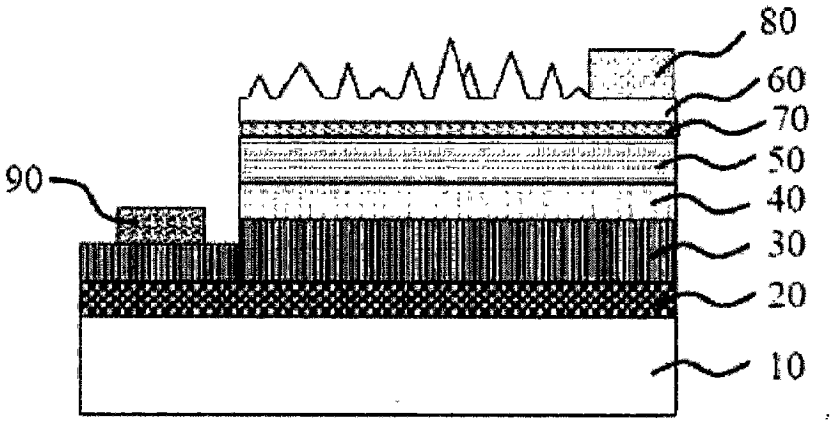


图 2

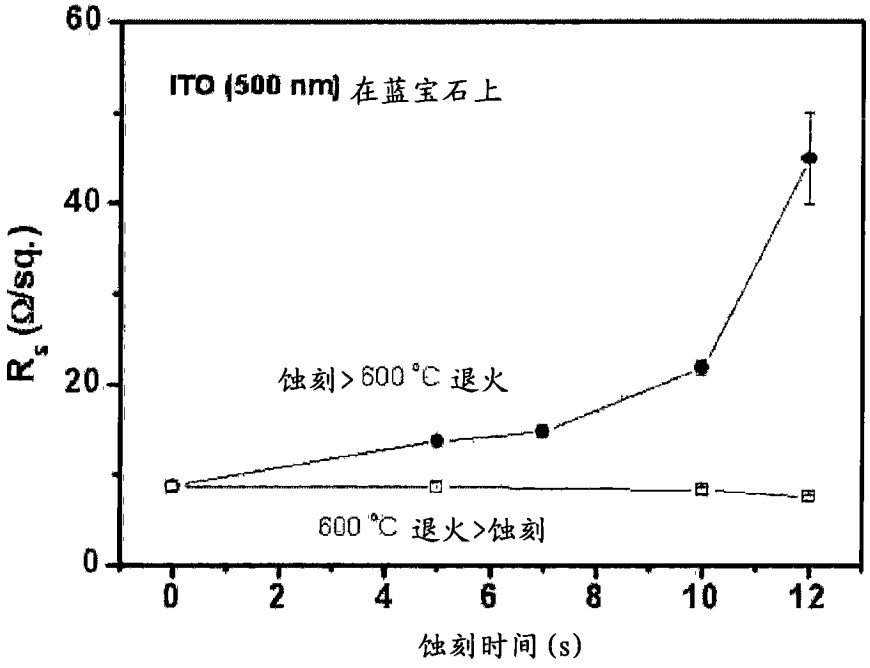

ITO (500 nm) 在蓝宝石上
蚀刻> 600 °C 退火
600 °C 退火>蚀刻
R_s (Ω/sq.)
蚀刻时间 (s)
0
20
40
60
0
2
4
6
8
10
12

图 3

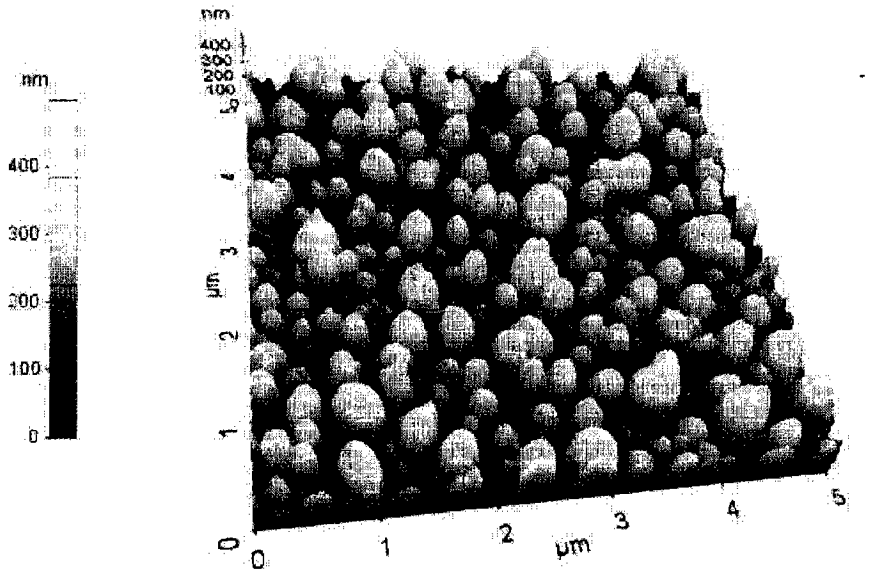

nm
400
300
200
100
0
μm
0
1
2
3
4
5

图 4A

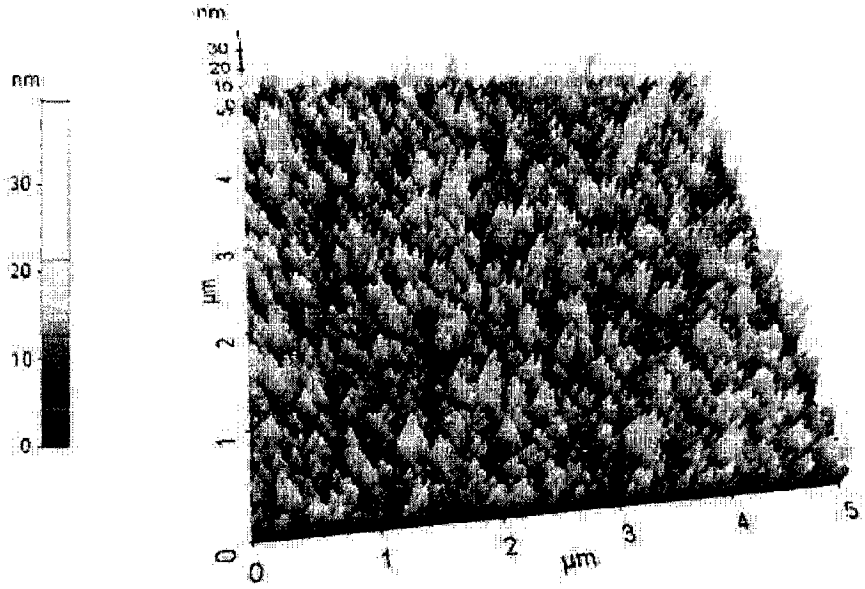

nm
30
20
10
0
μm
0
1
2
3
4
5

图 4B

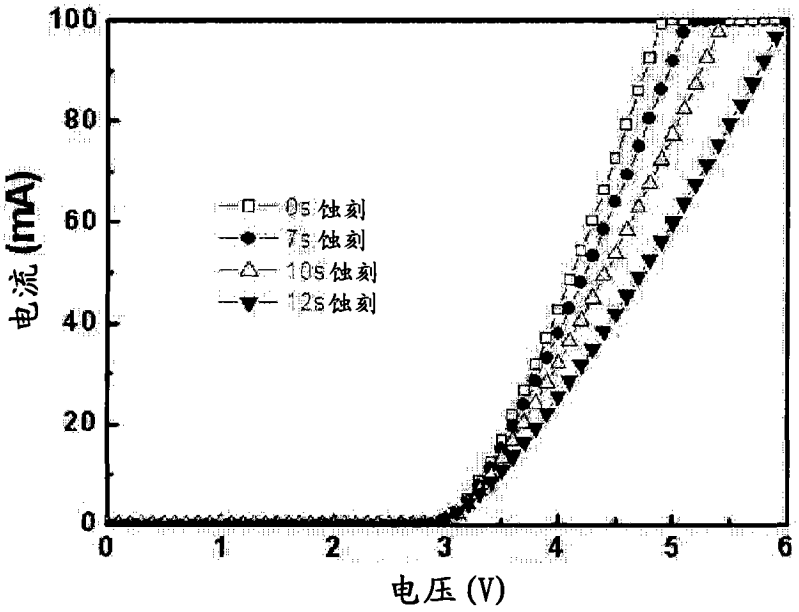

电流 (mA)
电压 (V)
0s 蚀刻
7s 蚀刻
10s 蚀刻
12s 蚀刻
0
20
40
60
80
100
0
1
2
3
4
5
6

图 5A

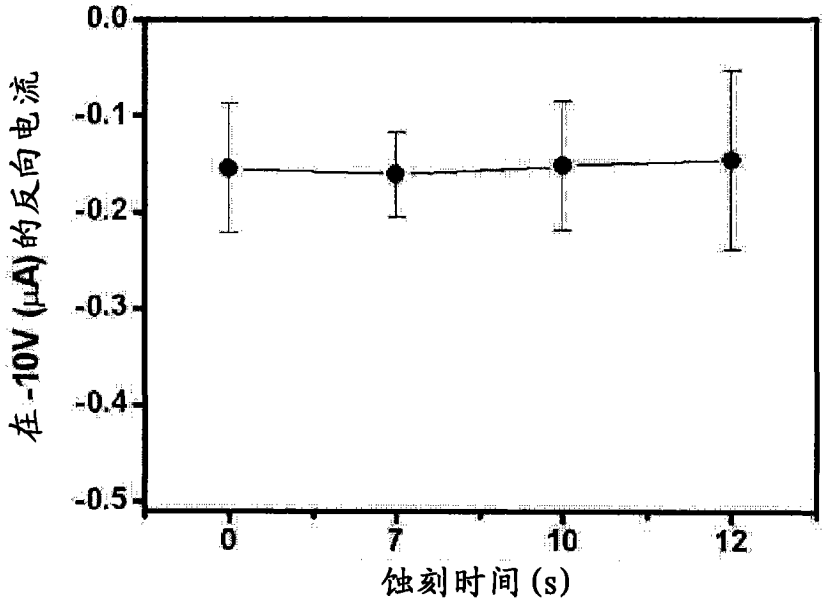

0.0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
在-10V (μA)的反向电流
0
7
10
12
蚀刻时间 (s)

图 5B

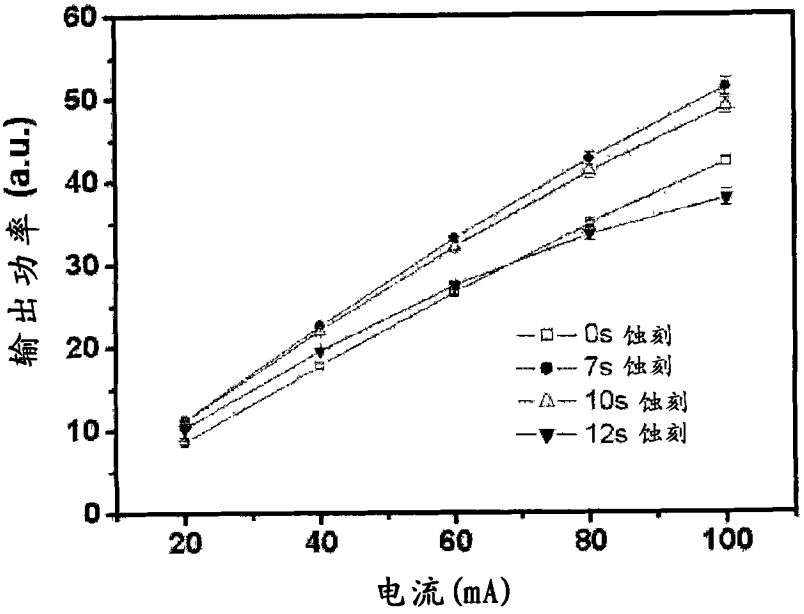

60
50
40
30
20
10
0
输出功率 (a.u.)
20
40
60
80
100
电流 (mA)
0s 蚀刻
7s 蚀刻
10s 蚀刻
12s 蚀刻

图 6

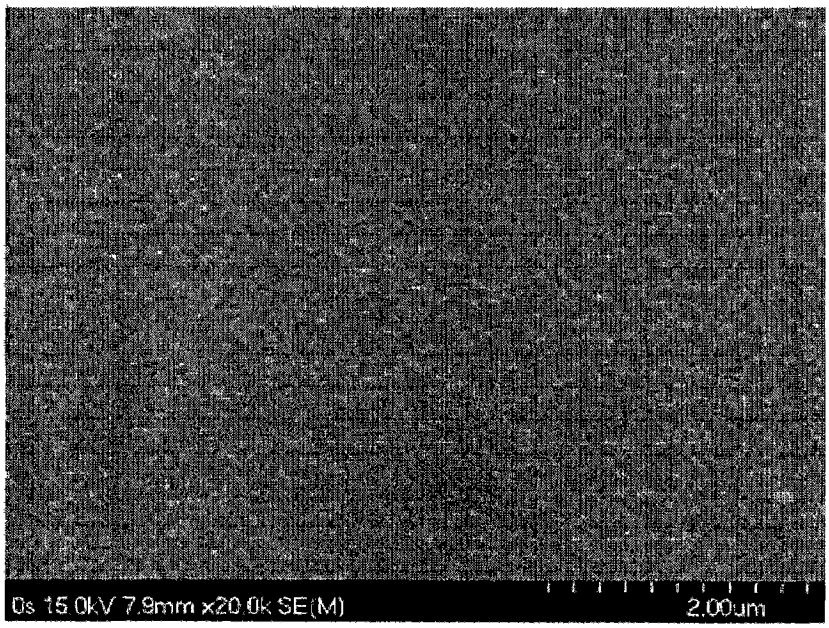


图 7A

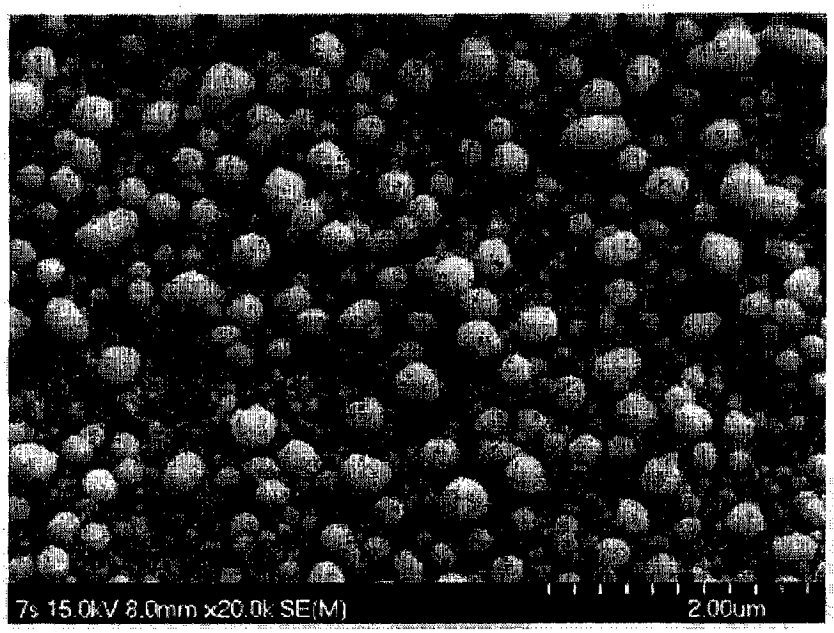


图 7B

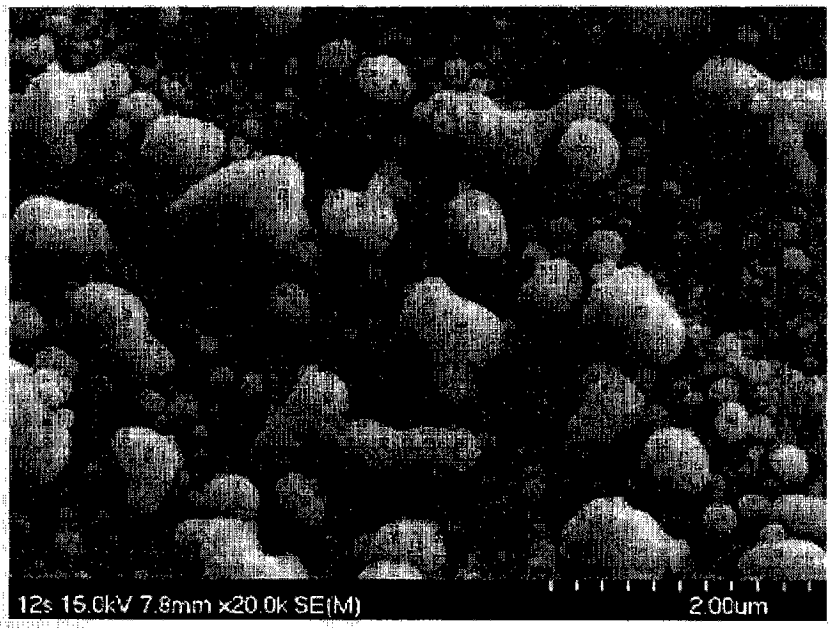


图 7C

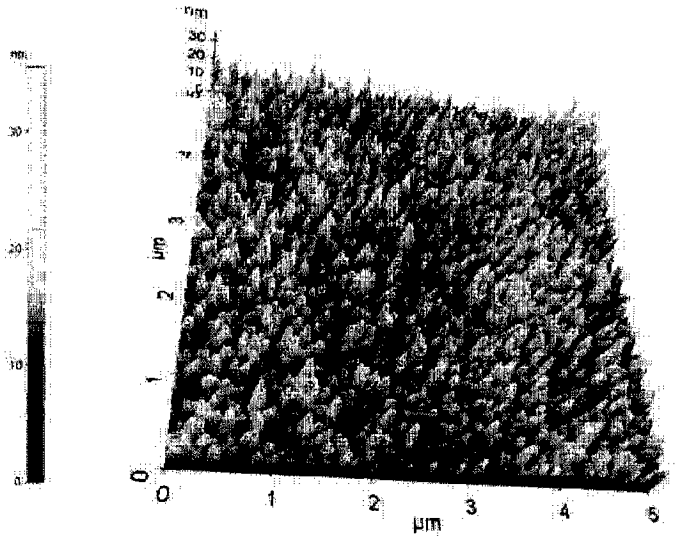


图 8A

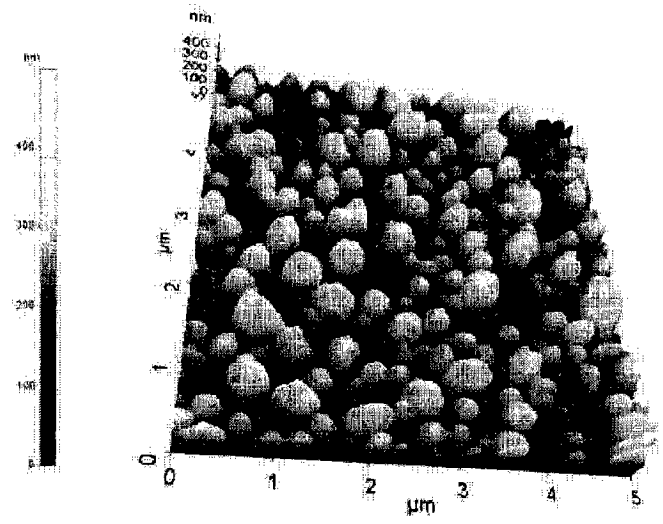


图 8B

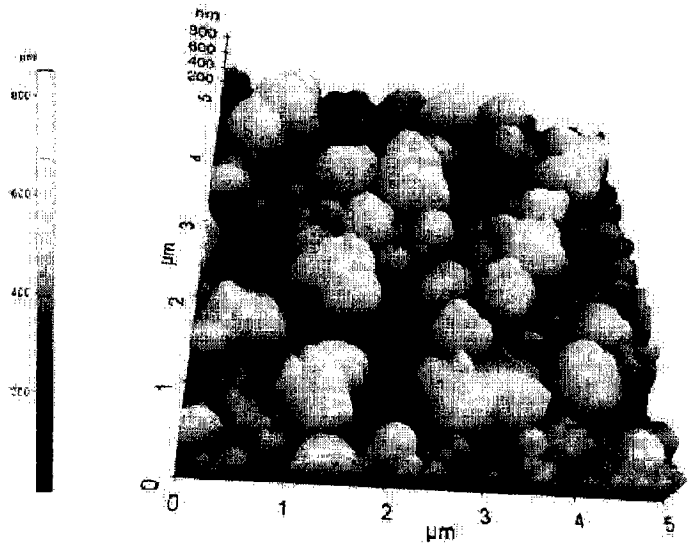


图 8C

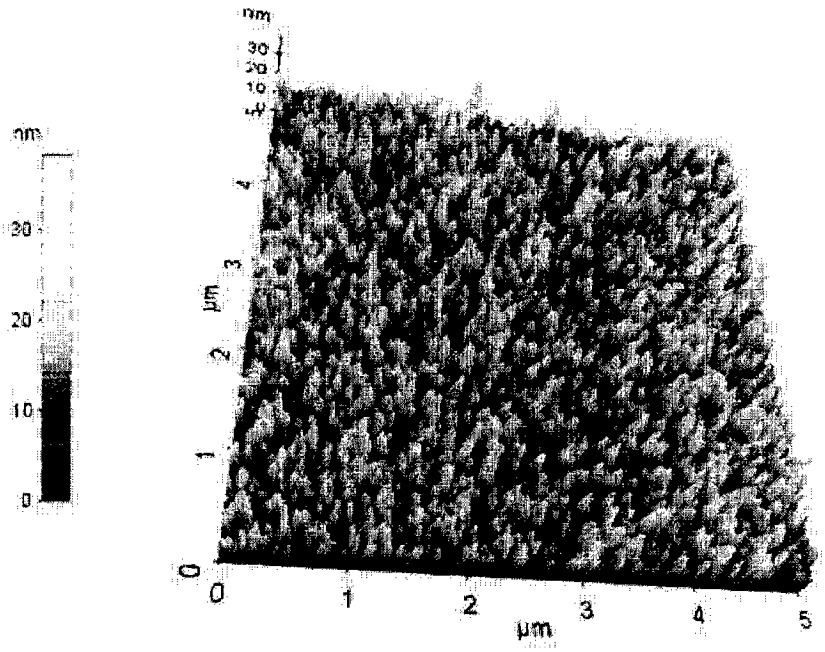

nm
30
20
10
0
nm
30
20
10
0
μm
0
1
2
3
4
5
μm

图 9A

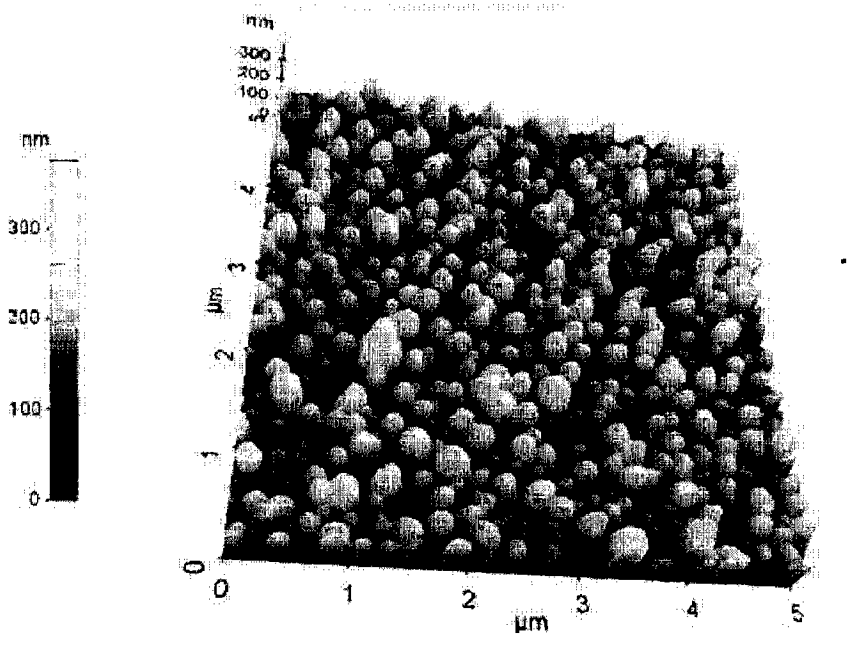

nm
300
200
100
0
nm
300
200
100
0
μm
0
1
2
3
4
5
μm

图 9B

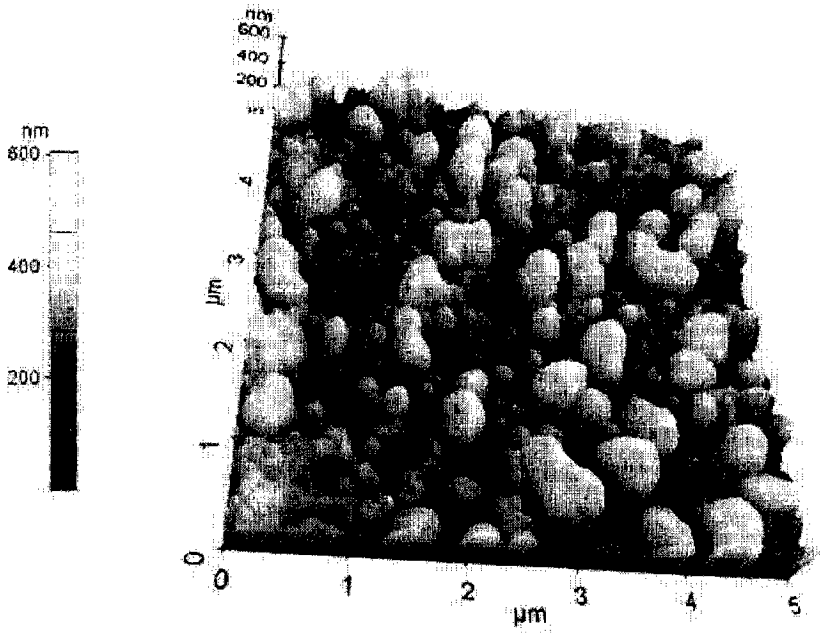


图 9C