

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

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



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200510011135.9

[43] 公开日 2006年7月12日

[11] 公开号 CN 1801498A

[22] 申请日 2005.1.7

[21] 申请号 200510011135.9

[71] 申请人 北京大学

地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号

[72] 发明人 于彤军 秦志新 杨志坚 胡晓东
陈志忠 祁山 陆羽 康香宁
商淑萍 童玉珍 丁晓民 张国义

[74] 专利代理机构 北京君尚知识产权代理事务所
代理人 俞达成

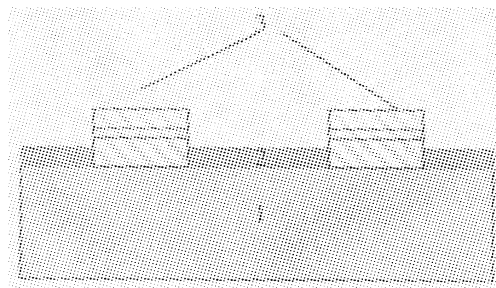
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

[54] 发明名称

分立晶粒垂直结构的LED芯片制备方法

[57] 摘要

本发明提出了一种高出光效率的管芯形状设计,通过岛状区域LED外延生长,生长分立晶粒LED芯片,激光剥离后将分立的LED芯片封装成上下电极的垂直结构的、具有较高光功率的LED的制备方法。分立晶粒LED外延层,在岛状区域外延生长过程中,由于应力分布的改善,外延层中位错密度减少,晶体质量提高,从而提高了LED内量子效率。设计岛状区域的形状,使生长获得的晶粒几何形状为适合光导出的多边形、圆形,提高LED的光功率。由于岛状区域生长有利于应力的释放,在激光剥离过程中降低Ga_N和蓝宝石衬底界面处由于激光辐照而产生的应力,减少剥离过程中的损伤,减少剥离前后LED的发光光谱因应力变化而发生移动,以保证剥离衬底而获得高性能的LED。



1. 一种分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 具体包括以下步骤:

- 1) 在蓝宝石衬底上淀积 SiO_2 , 并刻蚀 SiO_2 以限定岛状生长区域和几何形状;
- 2) 在刻蚀有 SiO_2 图形的衬底上依次生长 n 型 GaN、LED 有源层、p 型 GaN, 外延片还要进行常规的 P 型激活退火;
- 3) 在 p-GaN 上制备电极和反射层;
- 4) 将上述带有 P 电极 LED 外延片键合在 Si 或 Cu 支撑衬底上, 放置在真空室中抽走胶中气泡;
- 5) 激光剥离去除蓝宝石衬底;
- 6) 在 n-GaN 面上完成 n 电极制备;
- 7) 分离岛状生长区域为垂直电极结构的 LED 芯片。

2. 根据权利要求 1 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 支撑衬底加工成有利于芯片分割的图形及结构。

3. 根据权利要求 1 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 在岛状区域运用金属有机物化学汽相淀积技术生长分立晶粒 LED 外延层。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 刻蚀 SiO_2 将岛状生长区域和几何形状限定为圆形或多边形。

5. 根据权利要求 1 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 激光剥离蓝宝石衬底, 并在剥离过程中采用较低能量的激光束。

6. 根据权利要求 1 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 激光剥离去除蓝宝石衬底完成后, 去除外延层表面的金属 Ga。

7. 根据权利要求 1 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 用外延生长技术生长 AlGaIn 电子阻挡层。

8. 一种分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 具体包括以下步骤:

- 1) 在蓝宝石衬底上淀积 SiO_2 , 并刻蚀 SiO_2 以限定岛状生长区域和几何形状;
- 2) 在蓝宝石衬底上生长厚 n-GaN 外延层;
- 3) 在带有厚 n-GaN 岛状生长层的衬底上二次生长 Si 掺杂 GaN、LED 有源层、p 型 GaN, 外延片还要进行常规的 P 型激活退火;

- 4) 在 p-GaN 上制备电极和反射层;
- 5) 将上述带有 P 电极 LED 外延片键合在 Si 或 Cu 支撑衬底上, 放置在真空室中抽走胶中气泡;
- 6) 激光剥离去除蓝宝石衬底;
- 7) 在 n-GaN 面上完成 n 电极制备;
- 8) 分离岛状生长区域为垂直电极结构的 LED 芯片。

9. 根据权利要求 8 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 在岛状生长区域内首先采用氢化物气相外延技术生长厚 n-GaN 外延层。

10. 根据权利要求 8 所述的分立晶粒垂直结构的 LED 制备方法, 其特征在于: 在带有厚 n-GaN 岛状生长层的衬底上, 运用金属有机物化学汽相淀积外延生长技术, 二次生长 LED 外延结构。

分立晶粒垂直结构的 LED 芯片制备方法

技术领域

5 本发明属于光电技术领域，具体涉及结合金属有机物化学汽相淀积（MOCVD）外延生长技术、激光剥离和倒封装技术的一种功率型半导体发光二极管（LED）芯片的制备方法。本发明提出一种通过生长直接获得分立晶粒 LED 芯片的方法，提供 LED 芯片的几何图形设计不受 LED 芯片后工艺限制的新途径，适用于获得新型、大功率 LED 的制备。

10

背景技术

通常，LED 是在衬底上外延生长获得的，因而，LED 的制备受到衬底晶体的晶格结构的制约。晶格失配、热膨胀系数的差异，使外延生长阶段的芯片外延层中应力积累和释放而产生大量的位错，特别对蓝宝石衬底上 GaN 基 LED 外延层来说，位错密度高达 $10^{11}/\text{cm}^2$ ，从根本上制约了 LED 功率的进一步提高。在光导出方面，由于半导体折射率的与空气折射率差，抑制了光从半导体出射的效率，以及出光面的半导体材料吸收和金属电极层的吸收也不可忽视。另外，衬底的散热问题也大大地影响着功率型 LED 的特性。以上三方面成为影响功率型半导体 LED 芯片光功率主要因素。

15 芯片制备的后工艺——划片裂片得到的 LED 形状和成品率，也普遍受衬底上晶体结构的影响。对蓝宝石衬底上 GaN 基器件来说，更是由于蓝宝石的解理面与 GaN 外延层解理面不同而限制了芯片的形状，使有利于出光的管芯几何图形设计受到制约。另外，使用难于加工的衬底，增加了芯片制备的成本。

25 目前，有很多报道降低外延层中位错密度，提高晶体质量的研究结果，主要为选择侧向外延生长技术（LEO）和过渡层生长技术。日本的中村修二人采用侧向外延技术将源于衬底的贯穿位错密度降低了两个数量级，日本 Kazuyuki Tadatomo 等人图形化衬底上生长的 LED 外延层制备 LED 研究报告，位错密度降低为常规生长外延片的三分之一，而 LED 光功率提高近五倍，外量子效率达 24%；日本名城大学赤崎勇研究组的 M.Iwaya 等人报道低温 AlN 插入层使张应

力得到释放, 获得了外延片上与位错对应的暗点密度降低到 $2 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 的好结果; T.Wang 等人和 C.C.Yang 等报道的多种缓冲层结构也给出了与位错对应的腐蚀坑密度达到 10^6cm^{-2} 数量级的结果表明晶体质量显著提高, 并获得紫外光发光二极管 (UVLED) 功率大幅提高的良好结果。

5 对于 GaN 基材料的异质生长来说, 虽然侧向外延生长技术 (LEO) 和过渡层生长技术能够改善晶体质量的机理还有许多不清楚的地方, 但不能排除生长过程中应力的变化是一个重要因素。

采用激光剥离技术, 剥离蓝宝石衬底, 制备垂直电极结构的 GaN 基 LED, 已经成为一个值得关注的发展方向。日本日亚公司和德国的 Osram 公司已经推出该技术的相关设备。同时, 倒封装结构的 LED, 由于避免了 P 电极和 P-GaN 吸收, 利用并且折射率低于 GaN 的蓝宝石面出光, 已经证明能够使光功率明显提高, 即使不剥离蓝宝石衬底, 也能够大幅提高光功率 1.5 倍以上, 美国 Lumileds Lighting 的 J. J. Wierer 等报告的结果以及 Daniel Steigerwald 等提出的专利 US6573537 B1 表明倒装芯片出光效率提高 1.6 倍。

15 我国台湾的 J. T. Shu 等进行了 HVPE 岛状选择生长 LED 的方法, 观察到岛状生长区域的腐蚀坑密度 (EPD) 为 $1.5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$, 说明岛状外延生长获得了很好的晶体质量, 同时将 LED 外形做成六边形, 使得 LED 的光功率为常规的非岛状生长的方型 LED 的两倍。

因此, 运用改善晶体质量的生长方法、结合倒封装、垂直结构 LED 的制备, 是提高 LED 光功率的主要方向。

本项发明在上述研究基础上, 提出一种不同的改变外延生长过程中应力分布以降低位错密度提高晶体质量, 即 MOCVD 岛状生长, 结合高出光效率的管芯形状设计和激光剥离技术, 获得大功率 LED 芯片的简单、有效的新方法。

25 发明内容

本发明的目的是提出一种结合高出光效率的管芯形状设计, 通过岛状区域 LED 外延生长, 生长分立晶粒 LED 芯片, 激光剥离后将分立的 LED 芯片封装成上下电极的垂直结构的、具有较高光功率的 LED 的制备方法。

分立晶粒 LED 外延层, 在岛状区域外延生长过程中, 由于应力分布的改善,

外延层中位错密度减少，晶体质量提高，从而提高了LED内量子效率。

设计岛状区域的形状，使生长获得的晶粒几何形状为适合光导出的多边形、圆形，提高LED的光功率。

5 由于岛状区域生长有利于应力的释放，在激光剥离过程中降低Ga_N和蓝宝石衬底界面处由于激光辐照而产生的应力，减少剥离过程中的损伤，减少剥离前后LED的发光光谱因应力变化而发生移动，以保证剥离衬底而获得高性能的LED。

传统LED制备方法是MOCVD外延生长、电极制备、外延片减薄、分割获得芯片。本发明则在外延生长时即获得分立的LED晶粒，只需激光剥离去除衬底和电极制备，即可获得LED芯片，无需减薄、分割等工艺过程，即可获得LED

10 芯片，与常规LED工艺相比，减少了后工艺，降低了成本。

本发明提出的岛状区域外延生长获得分立晶粒的垂直结构LED的方法，工艺过程简单，易于实现，是提高发光二极管效率的有效途径。

该方法由于结合了激光剥离技术剥离蓝宝石衬底，制备成垂直结构的LED

15 芯片，而且芯片的形状设计为圆形和多边形，因而与J. T. Shu等报道的岛状生长获得的LED芯片方法有着显著的不同。

本发明的分立晶粒垂直结构发光二极管的制备方法有以下几个要点：

1. 在岛状区域外延生长分立晶粒LED外延层，区别于常规的整片生长和侧向外延生长，将生长限制在芯片尺度的一定区域内。
- 20 2. 生长过程中应力分布改善，可以生长比较厚的外延层，外延层中位错密度减少，晶体质量提高。
3. 在激光剥离过程中，岛状区域生长可以降低Ga_N和蓝宝石衬底界面处由于激光辐照而产生的应力，减少剥离过程中的损伤，减少剥离前后LED的发光光谱因应力变化而发生移动，以保证剥离衬底而获得高性能
- 25 的LED。
4. 岛状区域的几何图形为适合光从管芯导出的多边形和圆形，从而实现了通过生长控制管芯形状和尺寸，越过了后工艺加工获得多边形和圆形管芯的困难，为管芯制备提供了一条新的途径。
5. 在外延生长时即获得分立的LED晶粒，只需激光剥离去除衬底和电极

制备即可获得 LED 芯片, 无需对蓝宝石或 GaN 减薄、分割等工艺过程, 即可获得 LED 芯片, 与常规 LED 工艺相比, 减少了后工艺的花费, 降低了成本。

5 根据本发明的分立晶粒垂直结构发光二极管的制备方法, 具体技术方案有两种, 下面详细说明各个技术方案的具体步骤:

分立晶粒垂直结构的发光二极管芯片发光二极管的制备方法一, 具体步骤如下:

1. 在蓝宝石衬底上淀积 SiO_2 , 并刻蚀 SiO_2 以限定岛状生长区域和几何形状。将生长区的几何形状设计为有利于光导出多边形和圆形。

2. 在带有 SiO_2 图形的衬底上依次生长 n 型 GaN、LED 有源层、p 型 GaN; 外延片还要进行常规的 P 型激活退火。

3. 在 p-GaN 上制备电极和反射层, 电极金属要能够获得良好欧姆接触, 同时还要考虑到与起反射镜面作用的反射层金属有良好的粘附作用, 淀积之后要经过合金而获得与 p-GaN 间的欧姆接触; 反射层金属的选择为反射率高、稳定性好、与欧姆接触层金属有良好的粘附性, 对欧姆接触无不良影响的金属。

4. 将上述带有 P 电极 LED 外延片键合在 Si 或 Cu 支撑衬底上, 放置在真空室中抽走胶中气泡, 保证岛状生长层与支撑衬底表面均匀无空洞的紧密接触, 支撑衬底加工成具有诱导裂片功能的图形。

5. 激光剥离去除难于加工的蓝宝石衬底。由于 GaN 与蓝宝石衬底结合部分少, 激光剥离中可以采用较低能量的激光束, 减少了在剥离过程对界面处晶体的损伤。剥离完成后, 需要去除外延层表面的金属 Ga。

6. 在 n-GaN 面上完成 n 电极制备; 由于出光面的要求, n 电极要尽量占有较小的面积, 通常在保证焊线的最低要求尺度上设计电极尺寸。

7. 分离岛状生长区域为垂直电极结构的 LED 芯片。

分立晶粒垂直结构的发光二极管芯片发光二极管的制备方法二, 具体步骤如下:

1. 在蓝宝石衬底上淀积 SiO_2 , 并刻蚀 SiO_2 以限定岛状生长区域和几何形

状。将生长区的几何形状设计为有利于光导出多边形和圆形。

2. 在蓝宝石衬底上运用氢化物气相外延(HVPE)技术生长厚 n-GaN 外延层。

3. 在带有厚 n-GaN 岛状生长层的衬底上运用 MOCVD 技术二次生长 Si 掺杂 GaN、LED 有源层、p 型 GaN, 外延片还要进行常规的 P 型激活退火。

5 4. 在 p-GaN 上制备电极和反射层, 电极金属要能够获得良好欧姆接触, 同时还要考虑到与起反射镜面作用的反射层金属有良好的粘附作用, 淀积之后要经过合金而获得与 p-GaN 间的欧姆接触; 反射层金属的选择为反射率高、稳定性好、与欧姆接触层金属有良好的粘附性, 对欧姆接触无不良影响的金属。

10 5. 将上述带有 P 电极 LED 外延片键合在 Si 或 Cu 支撑衬底上, 放置在真空室中抽走胶中气泡, 保证岛状生长层与支撑衬底表面均匀无空洞的紧密接触, 支撑衬底加工成具有诱导裂片功能的图形。

6. 激光剥离去除难于加工的蓝宝石衬底。由于 GaN 与蓝宝石衬底结合部分少, 激光剥离中可以采用较低能量的激光束, 减少了在剥离过程对界面处晶体的损伤。剥离完成后, 需要去除外延层表面的金属 Ga。

15 7. 在 n-GaN 面上完成 n 电极制备, 由于出光面的要求, n 电极要尽量占有较小的面积, 通常在保证焊线的最低要求尺度上设计电极尺寸。

8. 分离岛状生长区域为垂直电极结构的 LED 芯片。

上述两种方法, 同样适用于外延层中带有 AlGaIn 电子阻挡层的 LED 的制备。

20 附图说明

下面结合附图对本发明进一步详细地说明:

图 1 岛状生长的平面几何图形结构;

图 2 n 型电极平面图;

图 3 (a) ~ (i) 为分立晶粒垂直结构 LED 芯片制备过程;

25 图 4 (a) 和 (b) 分别示意 Al 和 Ag 的反射率与膜厚的关系。

最佳实施例详细描述

下面参照本发明的附图, 更详细的描述出本发明的最佳实施例。

如图 3 (a) ~ (f) 所示为分立晶粒垂直结构发光二极管芯片制备过程, 图中 1 表示是蓝宝石衬底或带有 GaN 生长层的衬底, 2 是 SiO_2 , 3 是 LED 外延片, 4 是透明电极 (Ni/Au), 5 是反射层, 6 是支撑衬底 (Si 或 Cu), 7 是键合金属 (Au-Sn 合金)。下面结合附图详细说明最佳实施例一具体步骤:

- 5 (a) 在蓝宝石衬底 1 上淀积 SiO_2 2, 并刻蚀 SiO_2 2 以限定岛状生长区域和几何形状。生长区域的大小为 LED 器件尺寸, 生长区的几何形状为有利于光导出多边形和圆形, 图 1 中示例了矩形、六边形和圆形;
- (b) 在 (a) 步骤获得的衬底上, 运用 MOCVD 技术生长 LED 外延层, 并进行 P 型激活退火。
- 10 (c) 在 GaN 基 LED 外延片 3 p 面上蒸镀透明电极 4, 结构为 Ni (50~100Å) /Au (50~100Å), 然后在氧气氛中 500°C 下合金 5 分钟。
- (d) 在透明电极上蒸镀 Ni (50~100Å) /Al (300~500Å) /Ni (200Å) /Au (2000Å) 反射层 5。反射层 5 中高反射率金属可以为 Al 或 Ag, 对应波长, 可根据厚度与反射率关系进行调整。图 4 所示为对应于不同波长, Al 层厚度和 Ag 层厚度与反射率的关系曲线图。
- 15 (e) Si 或 Cu 支撑衬底上制备 SiO_2 绝缘层, 蒸镀 Au-Sn 合金或其他可用于键合的金属层 7, 并放置在真空室中抽走胶中气泡, 保证岛状生长层与支撑衬底表面均匀无空洞的紧密接触, 将支撑衬底加工成可以诱导裂片的图形及结构。
- 20 (f) 在约 300°C 或更低的温度下把 LED 外延片与 Si 衬底或铜衬底 6 键合。
- (g) 用 KrF 准分子激光器从蓝宝石衬底侧照射, 剥离蓝宝石衬底, 激光器波长 248nm, 照射能量密度 400 -600 mJ/cm^2 , 扫描频率为 1Hz; 剥离完成后, 需要去除外延层表面的金属 Ga。
- (h) 在 n-GaN 表面蒸镀 n 电极金属, 经过图形剥离获得 n 电极; 如图 3 所示为 n 型电极平面图, 图中电极结构为 Ti 200Å /Al 200~300Å /Ti 100~200Å /Au 4000Å。
- 25 (i) 分离岛状生长区域, 则获得大功率垂直电极结构的 LED 芯片。

最佳实施例二技术方案如下, 参考图 3 说明本实施例的具体步骤:

- (a) 在蓝宝石衬底 1 上淀积 SiO_2 2, 并刻蚀 SiO_2 2 以限定岛状生长区域和几何形状。生长区域的大小为 LED 器件尺寸, 生长区的几何形状为有利于光导出多边形和圆形, 图 1 中示例了矩形、六边形和圆形。
- (b) 在(a)步骤中获得的衬底上, 在蓝宝石衬底上运用氢化物气相外延(HVPE)技术生长厚 n-GaN 外延层, 获得岛状生长的 n 型 GaN 衬底。
- (c) 在(b)步骤获得的岛状 GaN 衬底上, 运用 MOCVD 技术二次生长 Si 掺杂 GaN、LED 有源层、p 型 GaN, 外延片还要进行常规的 P 型激活退火。
- (d) 在 GaN 基 LED 外延片 p 面上蒸镀透明电极 4, 结构为 $\text{Ni} (50\text{\AA}) / \text{Au} (50\text{\AA})$, 然后在氧气下 500°C 下合金 5 分钟。
- (e) 在透明电极上蒸镀 $\text{Ni} (50\sim 100\text{\AA}) / \text{Al} (300\sim 500\text{\AA}) / \text{Ni} (200\text{\AA}) / \text{Au} (2000\text{\AA})$ 反射层 5。反射层 5 中高反射率金属可以为 Al 或 Ag, 对应波长, 可根据厚度与反射率关系进行调整。图 4 所示为对应于不同波长, Al 层厚度与 Ag 层厚度与反射率的关系曲线图。
- (f) Si 或 Cu 支撑衬底上 1 制备 SiO_2 绝缘层, 蒸镀 Au-Sn 合金或其他可用于键合的金属层 7, 并放置在真空室中抽走胶中气泡, 保证岛状生长层与支撑衬底表面均匀无空洞的紧密接触, 将支撑衬底加工成可以诱导裂片的图形及结构 6。
- (g) 在约 300°C 或更低温度下把 LED 外延片与 Si 衬底或铜衬底 6 键合。
- (h) 用 KrF 准分子激光器从蓝宝石衬底侧照射, 剥离蓝宝石衬底, 激光器波长 248nm , 照射能量密度 $400\text{--}600\text{ mJ}/\text{cm}^2$, 扫描频率为 1Hz ; 剥离完成后, 需要去除外延层表面的金属 Ga。
- (i) 在 n-GaN 表面蒸镀 n 电极金属, 经过图形剥离获得 n 电极; 如图 3 所示为 n 型电极平面图, 图中电极结构为 $\text{Ti} 200\text{\AA} / \text{Al} 200\sim 300\text{\AA} / \text{Ti} 100\sim 200\text{\AA} / \text{Au} 4000\text{\AA}$ 。
- (j) 分离岛状生长区域, 则获得大功率垂直电极结构的 LED 芯片。

在以上对应两种分立晶粒垂直结构的发光二极管芯片的制备方法的制备方法的两个最佳实施例, 外延生长步骤中增加 AlGaN 电子阻挡层或进行其他生长, 将获得具有 AlGaN 电子阻挡层或其他外延结构的分立晶粒垂直结构的发光

二极管芯片,均可实施上述分立晶粒垂直结构的发光二极管芯片的制备方法所述的技术方案。

本项发明的优点:

- 5 (1) 在岛状区域外延生长分立晶粒 LED 外延层,区别于常规的整片生长和侧向外延生长,将生长区域限制在芯片尺度内,获得芯片尺寸的高质量岛状 LED 外延层。
- (2) 生长过程中应力分布改善,可以生长比较厚的外延层,外延层中位错密度减少,晶体质量提高,使 LED 发光效率提高。
- (3) 直接在岛状图形衬底上实施与普通 GaN-based LED 生长接近工艺,容易实现量产;
- 10 (4) 在激光剥离过程中,岛状区域生长可以降低 GaN 和蓝宝石衬底界面处由于激光辐照而产生的应力,减少剥离过程中的损伤,减少剥离前后 LED 的发光光谱因应力变化而发生移动,以保证剥离衬底而获得高性能的 LED。
- (5) 岛状区域的几何图形为适合光从管芯导出的多边形和圆形,从而实现了通过生长控制管芯形状和尺寸,越过了后工艺加工获得多边形和圆形管芯的困难,为管芯制备提供了一条新的途径。
- 15 (6) 在外延生长时即获得分立的 LED 晶粒,只需激光剥离去除衬底和电极制备即可获得 LED 芯片,无需对蓝宝石或 GaN 减薄、分割等工艺过程,即可获得 LED 芯片,与常规 LED 工艺相比,减少了后工艺的花费,降低了成本。
- 20 (7) p 型反射层采用高反射率的 Al 复合层结构,提高芯片出光效率。

本项发明对 GaN 基大功率发光器件提供新的方法,尤其对短波长的发光二极管具有重要意义。应用该方法制备的 LED,具有成为主流潜力的垂直电极结构,因而光功率和热学特性好,而且由于采用有利于光出射的管芯形状(圆形、多边形),光功率会进一步提高。与目前报道的提高出光效率的方法相比,本发明所涉及的 LED 芯片制备工艺过程简单,有利于实现产业化。

25 尽管为说明目的公开了本发明的最佳实施例和附图,但是本领域的技术人员可以理解:在不脱离本发明及所附的权利要求的精神和范围内,各种替换、变化和修改都是可能的。因此,本发明不应局限于最佳实施例和附图所公开的内容。

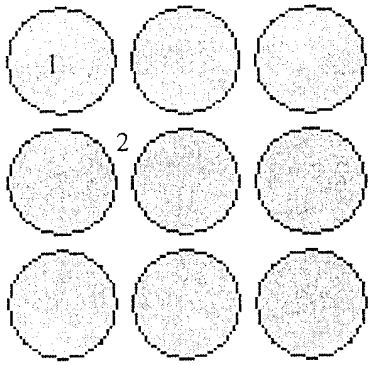


图 1a

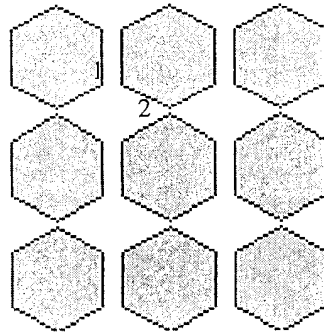


图 1b

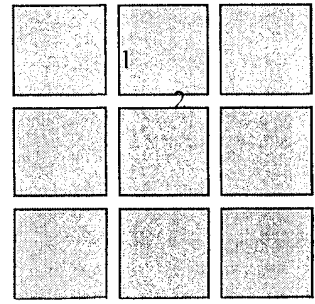


图 1c

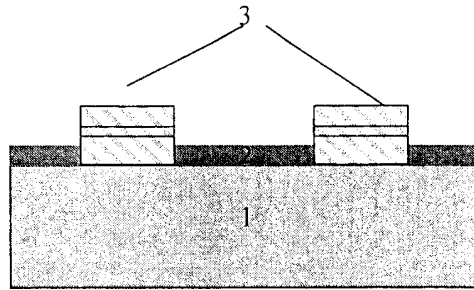


图 2

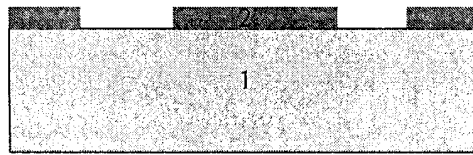


图 3 a

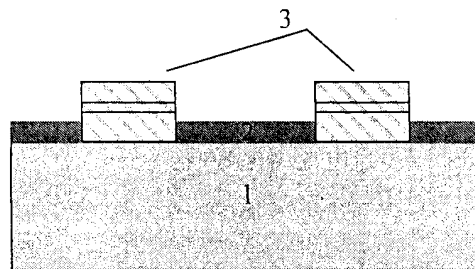


图 3b

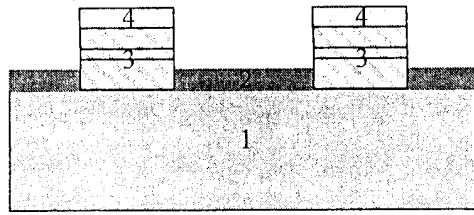


图 3c

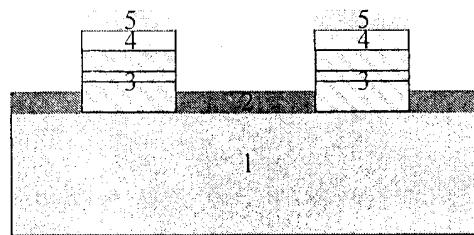


图 3d

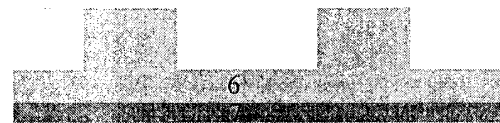


图 3e

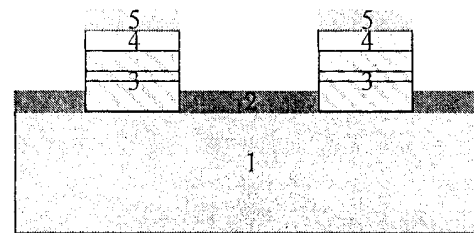
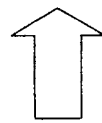
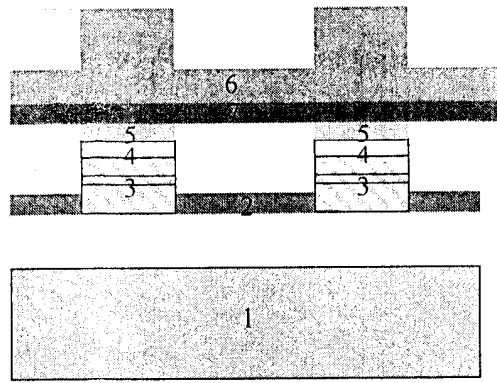


图 3f



KrF 激光

图 3g

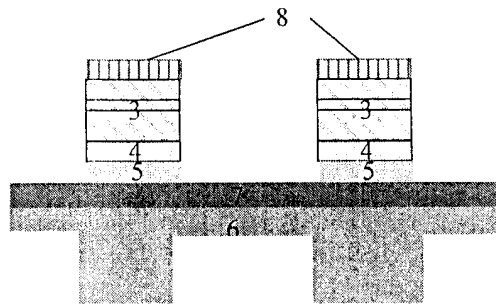


图 3h

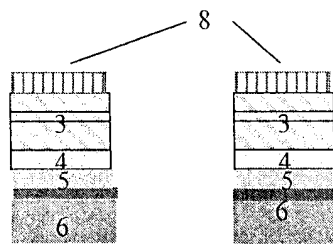


图 3 i

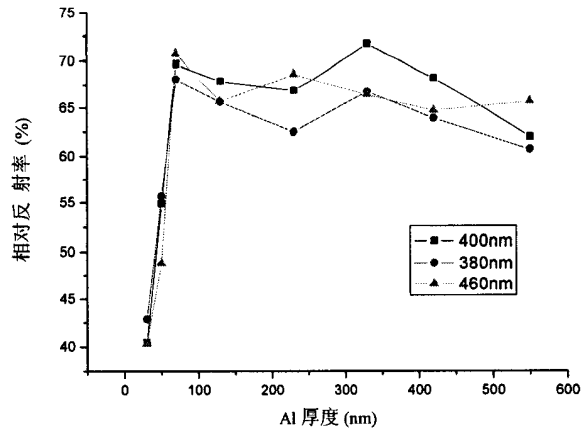


图 4a

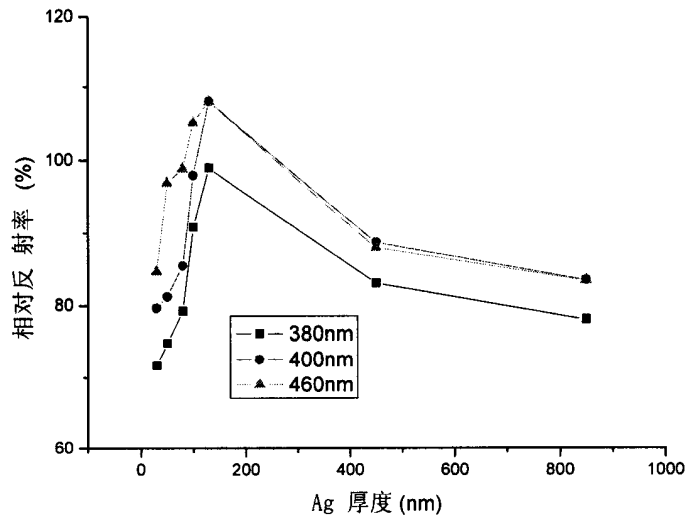


图 4b