



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102388513 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 10

(21) 申请号 201080016327. 8

(22) 申请日 2010. 01. 22

(30) 优先权数据

61/151, 631 2009. 02. 11 US

09153659. 9 2009. 02. 25 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2011. 10. 11

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/DK2010/050015 2010. 01. 22

(87) PCT国际申请的公布数据

W02010/091688 EN 2010. 08. 19

(73) 专利权人 丹麦科技大学

地址 丹麦灵比

(72) 发明人 郑一淑

(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司

公司 11243

代理人 钟晶 於毓桢

(51) Int. Cl.

H01S 5/20 (2006. 01)

H01S 5/183 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 2007/0201526 A1, 2007. 08. 30, 全文.

WO 2008/068209 A1, 2008. 06. 12, 全文.

CN 101227061 A, 2008. 07. 23, 全文.

Lydie Ferrier, et al. Vertical

microcavities based on photonic crystal

mirrors for III-V/Si integrated

microlasers. 《Proc. of SPIE》. 2008, 第 6989

卷 (第 2008 期), 全文.

审查员 张辉

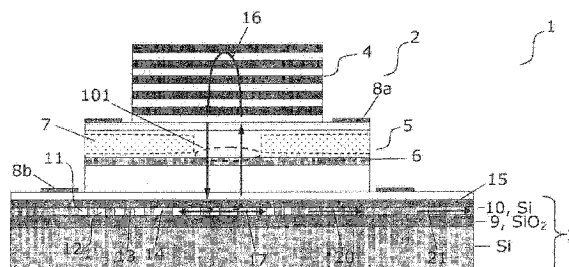
权利要求书2页 说明书5页 附图17页

(54) 发明名称

混合垂直腔激光器

(57) 摘要

本发明为硅平台 (3) 上的光回路提供光源 (2)。垂直激光腔由布置在顶部镜 (4) 与衬底上硅层 (10) 中光栅区 (11) 内的底部光栅镜 (12) 之间的增益区 (101) 形成。用于接受来自光栅区 (11) 的光的波导 (18, 19) 在光栅区内部形成或与之连接, 并且作为 VCL 的输出耦合器发挥作用。因此, 垂直激光模 (16) 耦合于该硅层中所形成的面内波导的横向面内模 (17, 20), 并且光可以提供至例如硅中的 SOI 或 CMOS 衬底上的光子回路。



1. 使用硅平台中的底部光栅镜在硅平台上混合垂直腔激光器结构 (1) 的方法, 该方法包括:

提供分层结构 (2), 该分层结构 (2) 包括由 III-V 材料形成的活性区 (5) 和不作为输出耦合镜使用并且具有大于 99.5% 的反射率的高度反射性顶部镜 (4);

在硅层 (10) 中形成光栅区 (11), 所述硅层 (10) 被具有比所述硅层低的折射率的层 (9) 支持, 该光栅区包含由硅层部分 (12) 形成的一维 (1D) 或二维 (2D) 周期性折射率光栅 (11) 以及在该硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域 (13);

在硅层中形成带有末端部分的波导 (18, 19), 所述末端部分形成在该光栅区内部或与该光栅区邻接以促进来自光栅区的光横向输出耦合于该波导; 并且

在光栅区上布置所述分层结构, 包括在该分层结构与该光栅区之间提供折射率比该硅层的折射率低的层 (15、15'、15''), 从而周期性折射率光栅构成底部光栅镜, 以在顶部镜和光栅区之间形成垂直腔激光器腔。

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 还包括引发垂直腔激光器腔中的激射和将来自垂直腔激光器腔的光耦合于光栅区的横模。

3. 根据权利要求 2 所述的方法, 其中硅层中所形成的波导的末端部分包含在光栅区内部形成的光栅波导 (18), 该方法还包括将来自光栅区的横模的光耦合于光栅波导的导模。

4. 根据权利要求 2 或 3 所述的方法, 其中硅层中所形成的波导包含在光栅区外部形成的集成平面折射率对比波导 (19), 该方法还包括将来自光栅区的光耦合于折射率对比波导的导模。

5. 根据权利要求 1-3 任一项所述的方法, 其中通过控制所述分层结构与所述光栅区之间的较低折射率层 (15、15'、15'') 的厚度来控制垂直腔激光器腔的有效腔长度 d_{eff} 以及激射波长 λ 。

6. 根据权利要求 1-3 任一项所述的方法, 其中将垂直腔激光器的光学增益区 (101、201、301、401、501) 的位置限定在光栅区上的分层结构之后。

7. 混合垂直腔激光器结构 (1), 包括:

- 分层结构 (2), 该分层结构 (2) 包括由 III-V 族材料形成的活性区 (5) 和不作为输出耦合镜使用并且具有大于 99.5% 的反射率的高度反射性顶部镜 (4); 和

- 在硅层 (10) 中形成的光栅区 (11), 所述硅层 (10) 被具有比所述硅层低的折射率的层 (9) 支持, 该光栅区包含由硅层部分 (13) 形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅 (12) 以及在该硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域 (14);

- 在该硅层的光栅区的顶部提供的、具有比该硅层的折射率低的折射率的层 (15、15'、15'');

其中分层结构布置在光栅区上, 从而周期性折射率光栅构成了底部光栅镜, 以在顶部镜与光栅区之间形成垂直腔激光器腔, 该底部光栅镜也促进在垂直腔激光器腔的模中的光耦合于光栅区的面内模, 和

- 在该硅层中形成带有末端部分的波导 (18, 19), 所述末端部分形成在该光栅区内部或与该光栅区邻接以促进来自光栅区的光耦合于该波导。

8. 根据权利要求 7 所述的混合垂直腔激光器结构, 其中在分层结构与光栅区之间的较低折射率层是在分层结构上形成的氧化物层。

9. 根据权利要求 7 所述的混合垂直腔激光器结构,其中在分层结构与光栅区之间的较低折射率层(15、15'')包含空气,并且其中当分层结构布置在光栅区之上时,分层结构包含一个或多个台面(25、715)以形成空气隙。

10. 根据权利要求 7-9 任一项所述的混合垂直腔激光器结构,其中硅层中所形成的波导的末端部分包含在该光栅区内形成的光栅波导(18),该光栅波导被布置为促进来自光栅区的光耦合于光栅波导。

11. 根据权利要求 7-9 任一项所述的混合垂直腔激光器结构,其中硅层中所形成的波导包含在光栅区外部的硅层中形成并被布置以促进来自光栅区的光耦合于折射率对比波导的集成平面折射率对比波导。

12. 根据权利要求 10 所述的混合垂直腔激光器结构,其中硅层中所形成的波导包含在光栅区外部的硅层中形成并被布置以促进来自光栅区的光耦合于折射率对比波导的集成平面折射率对比波导。

13. 带有横向取向的波导的硅基光栅镜,包括:

- 被层(9)支持的硅层(10),所述层(9)具有比所述硅层低的折射率;
- 光栅区(11),包含由硅层部分(13)所形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅(12)以及在硅层中形成的并具有比该硅层的折射率低的折射率的区域(14);
- 至少部分光栅区,用于形成光栅镜,来正常反射入射光并且使入射光正常耦合于光栅区的面内模(17);和
- 在硅层中形成的带有末端部分的波导(18, 19),所述末端部分形成在该光栅区内部或与光栅区邻接以促进来自光栅区面内模的光耦合于该波导。

14. 分层结构(2)和用于接受该分层结构的硅平台衬底(3):

- 该分层结构包括由 III-V 族材料形成的活性区(5)和不作为输出耦合镜使用并且具有大于 99.5% 的反射率的高度反射性顶部镜(4);
- 该硅平台衬底包含:
 - 被层(9)支持的硅层(10),所述层(9)具有比所述硅层低的折射率;
 - 光栅区(11),包含由硅层部分(13)形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅(12)以及在硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域(14);和
 - 在硅层中形成的带有末端部分的波导(18, 19),所述末端部分形成在该光栅区内部或与光栅区邻接以促进来自光栅区的光耦合于该波导;

其中分层结构或光栅区至少之一包含或涉及如下构造(15、15'、25、715),即其中分层结构设置在光栅区之上,所述构造将在该光栅区上方提供折射率比该硅层的折射率低的层(15、15'、15'')。

混合垂直腔激光器

发明领域

[0001] 本发明涉及提供光至与成熟硅加工技术相容的硅平台 (silicon platform) 上的光子回路 (Photonic Circuit)。尤其,本发明涉及通过使用光栅镜 (Grating-Mirror) 垂直腔激光器 (Vertical-Cavity Laser) 提供光至此种回路。

背景技术

[0002] 在硅基光子回路中集成微小且高效电泵浦 (electrically pumped) 光源的挑战是熟知的。

[0003] Gunn (Photonics Spectra, 2006 年 3 月, 第 62-67 页) 描述了这种挑战并提出一种解决方案, 其中光由非集成的外部光源提供。经一条光纤, 将光引导至集成的全息透镜并且因而与一集成的波导耦合。这种方法具有需要繁琐校准和后续封装的缺点。

[0004] Fang 等人 (Optics Express, 14, 第 9203 页 (2006)) 描述了边发射电泵浦 AlGaInAs- 硅迅衰激光器 (evanescent laser) 架构。该架构是与绝缘体 (SOI) 衬底上的硅键合的晶片以及完全被下方 SOI 衬底中的硅波导所限定的激光腔。WO 2008/068209 中公开了也与硅波导耦合的边发射性分布式布拉格反射镜 (DBR) 激光器。尽管基于边发射激光器的解决方案提供与光子回路的容易的耦合, 但是它们具有相对高的电力消耗和非本征 (non-intrinsic) 单模 (single mode) 控制的缺点。

[0005] 如 US 2007/0201526 中公开的垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 具有低电力消耗和优异单模控制的优点。然而, 其缺点在于因它们的表面发射设计, 这些激光器难以与硅中集成的波导耦合。

[0006] Ferrier L. 等人: " Vertical microcavities based on photonic crystal mirrors for III-V/Si integrated microlasers (用于 III-V/Si 集成微激光器的基于光子晶体镜的垂直微腔) "; Proc. of the SPIE, 第 6989 卷, 2008 年, 第 69890W-1-69890W-12 页讨论了与使用光子晶体 (PhC) 镜并且与横向波导耦合的垂直微腔相关的许多设置。

[0007] 因此, 在硅平台上集成光源的改良方式将是有利的, 并且尤其, 提供光至光子回路的更高效和 / 或更可靠方式将是有利的。

发明内容

[0008] 本发明的一个目的是提供现有技术的一种替代方案。

[0009] 尤其, 可以将以下视为本发明的目的: 提供解决现有技术中上文所提及问题的方法和混合垂直腔激光器 (混合 VCL) 结构以提供光至光回路。

[0010] 因而, 上述目的以及其他几个目的意图在本发明的第一方面通过使用硅平台中的底部光栅镜在硅平台上制作多种混合 VCL 结构来实现, 所述方法包括:

[0011] 提供包括由 III-V 材料形成的活性区和高度反射性顶部镜的分层结构;

[0012] 在硅层中形成光栅区, 所述硅层被折射率比该硅层低的层支持, 该光栅区包含由硅层部分形成的一维 (1D) 或二维 (2D) 周期性折射率光栅和在该硅层中形成的并且具有比

该硅层低的折射率的区域；

[0013] 在所述硅层中形成波导，所述波导被形成成为带有末端部分，所述末端部分形成在光栅区内部或与之邻接以促进来自光栅区的光横向输出耦合于该波导，这可以通过在光栅区内部和 / 或与光栅区连接（如邻接）形成该波导来获得；并且

[0014] 在光栅区上设置所述分层结构，包括在所述分层结构与所述光栅区之间提供折射率比所述硅层的折射率低的层，从而周期性折射率光栅构成底部光栅镜以使得在所述顶部镜和所述光栅区之间形成 VCL 腔。该波导优选地相对于 VCL 腔为横向取向并且作为 VCL 的输出耦合波导发挥作用。

[0015] 下文中，将描述众多的其他方面、优选和 / 或任选的特征、要素、实例和实施。根据需要，相对于一个实施方式或方面所描述的特征或要素可以与其他实施方式或方面组合或适用于它们。例如，就混合 VCL 结构而言适用的结构性和功能性特征也可以通过适宜调整作为就用于混合 VCL 结构的方法而言的特征使用，并且反之亦然。另外，对本发明人所实现的本发明的潜在机制的解释用于解释性目的，并且它们不应当在用于推断本发明的事后分析中使用。

[0016] 包括高度反射性顶部镜、活性区和底部光栅镜的结构既称作“光栅镜垂直腔激光器 (GMVCL) 结构”，又称作具有底部光栅镜或使用底部光栅镜所形成的 VCL 结构。在本描述的意思范围内，这些术语具有相同的意思。另外，包括高度反射性顶部镜和活性区，但无底部光栅镜的分层结构称作“部分 VCL 结构”或根据上下文，简单地称作“分层结构”。

[0017] 混合 VCL 结构横向地发射光至面内 (in-plane) 波导，同时垂直腔表面发射的激光 (VCSEL) 从镜表面垂直地发射至空气。因此，混合 VCL 是这样的结构，其包含具有高度反射性从而不作为输出耦合器发挥作用的顶部镜，以 III-V 材料形成的活性区和形成高度反射性底部光栅镜以产生带顶部镜的 VCL 腔的硅基光栅区，以及用于从 VCL 腔发射光至硅衬底中外部光子回路的横向取向的波导。

[0018] 可以在例如 US 2007/0201526 中找到使用二维 (2D) 光栅镜的现有技术 VCSEL 的实例。该结构在几个方面不同于本发明，其中之一是底端镜之一具生例如约 -3dB 的高路由 / 耦合效率，其可比于现有技术的全息光栅耦合器的耦合效率。然而，在不涉及 PBG 模的另一个类型的光栅镜中，在自由空间模中的光在光栅中衍射，但是并不与 PBG 模强烈耦合；因而，路由效率较低。

[0019] 波导，也称作面内、输出耦合波导，在硅层中形成，并且优选地包含在光栅区中的光栅波导 (GWG) 和该光栅区外部的折射率对比波导 (ICWG)。GWG 是促进从 PBG 模提取部分光至 ICWG 模的中间波导 (intermediate waveguide)。通过优化 GWG 的拓扑学和 GWG 和 ICWG 的连接部分，路由效率可以进一步提高超过 -3dB。优选带有横向波导的底部光栅镜具有约 99.5% 的反射率和 -3dB 的路由效率。这种反射率值可比于常规 VCSEL 的垂直输出镜的反射率。

[0020] 该光栅镜的路由功能很不同于常规光栅耦合器的耦合功能。在本发明的光栅镜中，极小部分的入射光被路由至面内波导，而大部分的入射光被反射。例如，当光栅镜具有 99.5% 的反射率和 -3dB 的路由效率时，99.5% 的入射光被反射，而 0.25% 的入射光被输出至波导。相反，在现有技术的全息光栅耦合器中，-3dB 即 50% 的入射光与波导耦合 (Photonics Spectra, 2006 年 3 月, 第 62-67 页)。

[0021] 参与与 PBG 模的共振耦合的高度反射性光栅镜与波导形式的面内输出耦合器的这种组合是新颖的,其中所述的波导在光栅区内部形成或与之连接。迄今报道的大部分似乎相似的光栅结构在结构性形状、功能或反射过程(涉及慢光模)的方面不同于本发明的光栅镜。例如:

[0022] ●在 US 2007/0153860 中, I. -S, Chung 等人, (Subwavelength Grating-Mirror VCSEL With a Thin Oxide Gap(具有薄氧化物隙的亚波长光栅镜 VCSEL)”, IEEE Photonics Technology Letters, 2(2008) 20, 第 105-107 页) 和 WO 2005/089098 中, 反射不涉及与慢光 PBG 模的共振耦合;

[0023] ●在 US 6, 031, 243 中, 光栅不作为反射镜工作;

[0024] ●在 US 2007/0201526 中, 光栅镜不具有用于横向输出而连接的波导, 并且慢光 PBG 模在色散图中远离 Γ (gamma) 点;

[0025] ●在 R. Jones 等人 (“Grating based hybrid silicon lasers(基于光栅的混合硅激光器)”, Proceedings of SPIE, 第 7230 卷, 第 72300U-1 页中, 光栅用来选择激射频率, 既不作为反射镜也不作为路由器来发挥作用;

[0026] ●在 H. Wu 等人 (“超宽带 SOI 二元闪耀光栅镜 (Ultra broadband SOI binary blazed grating mirror)”, 第五届 IV 族光子学 IEEE 国际大会论文集 (5th IEEE International Conference on Group IV Photonics), 第 299-301 页) 中, 光栅是表面耦合镜使用并且具有优选大于 99.95% 的反射率的高度反射性顶部镜; 和

[0027] - 在被具有较低折射率的层支持的硅层中形成的光栅区, 该光栅区包含由硅层部分形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅以及在该硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域;

[0028] - 在该硅层的光栅区的顶部提供的、具有比该硅层的折射率低的折射率的层;

[0029] 其中分层结构设置在光栅区上, 从而周期性折射率光栅构成了形成于顶部镜与光栅区之间的 VCL 腔的底部光栅镜, 该底部光栅镜也促进处于 VCL 腔垂直模的光耦合于光栅区的面内模, 和

[0030] - 在硅层中形成的具有末端部分的波导, 所述末端部分形成在光栅区内部或与之邻接以促进来自光栅区的光耦合于该波导。

[0031] 第三方面涉及具有光栅区的硅基衬底, 该光栅区来自第二方面, 但单独地提供。因而, 在第三方面, 本发明提供带有横向取向的波导的硅基光栅镜, 其包括:

[0032] - 被具有较低折射率的层支持的硅层;

[0033] - 光栅区, 包含由硅层部分所形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅以及在所述硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域;

[0034] - 至少部分光栅区形成光栅镜, 用于正常反射入射光并且使入射光与光栅区的面内模正常耦合; 和

[0035] - 在该硅层中形成的具有末端部分的波导, 所述末端部分形成在光栅区内部或与之邻接以促进来自光栅区面内模的光耦合于该波导。

[0036] 在光栅区顶部上形成的任何层, 例如低折射率层, 对于激射波长是透明的。例如, 激射波长可以是 1.1、1.3 和 1.55 μm 。

[0037] 在该器件的制造加工期间, 可以通过以平版印刷方式改变光栅设计(即光栅的厚

度、周期性、空气填充率和图案形状)来改变光栅镜的反射率,同时可以通过改变硅光栅上方的低折射率层的厚度来调节 GMVCL 的激射波长。

[0038] 在第四方面,一起提供带有来自第二方面的光栅区的部分 VCL 结构和衬底来作为单独、未装配的结构。因而,在第三方面,本发明提供如第二方面中所述的部分 VCL 结构和如第二方面中所述的硅层,但是作为替代连接结构的装配用套件(a kit for assembly)。

[0039] 额外地或可选择地,第四方面可以提供分层结构和用于接受该分层结构的硅平台衬底。

[0040] - 该分层结构包含以 III-V 族材料形成的活性区和不作为输出耦合镜使用并且具有接近于 100% (例如,高于 99.95%) 的反射率的高度反射性顶部镜;

[0041] - 该硅层被具有较低折射率的层支持并且包含:

[0042] o 光栅区,包含由硅层部分所形成的 1D 或 2D 周期性折射率光栅以及在该硅层中形成的并且具有比该硅层的折射率低的折射率的区域;和

[0043] o 在该硅层中形成的具有末端部分的波导,所述末端部分形成在光栅区内部或与之邻接以促进来自光栅区的光耦合于该波导;

[0044] 其中分层结构或光栅区至少之一包含或涉及这样的构造:当该分层结构在该光栅区上布置时,所述构造将在该光栅区上方提供折射率比该硅层的折射率低的层。

[0045] 在一些实施方式中,光栅区中的 GWG 可以省略,从而耦合是直接从周期性折射率光栅的面内 PBG 模至光栅区外部形成的波导,如折射率对比波导。然而,这可能降低耦合效率。

[0046] 优选该方法的实施方式包括来自 VCL 腔的光耦合于光栅区的面内 PBG 模。该混合结构因而发挥有效提供光至硅层中面内光栅模的作用,这有利于提供光至硅平台上的光子回路。

[0047] 可以通过中间 GWG 促进与 ICWG 的耦合,所述的中间 GWG 优选地在光栅区内部形成。在这个实施方式中,该方法的实施方式还包括来自光栅区面内 PBG 模的光耦合于 GWG 的波导模,其中所述的 GWG 在硅层中、优选地在光栅区内部形成。这种布置可以通过以下方式实现:当 VCL 发射光时确保底部光栅镜中 GWG 模和 VCL 腔模之间出现部分重叠,以及设计 GWG 的几何形状,从而 GWG 模的模式色散应当相似于或绝热地(adiabatically)变换成 PBG 模的模式色散。

[0048] 可以优选优化 GWG 的拓扑学和 GWG 和 ICWG 的连接部分,旨在进一步降低模耦合/路由期间不想要的散射损失,从而提高总体路由效率。

[0049] 进一步优选在硅层上布置部分 VCL 结构后限定 VCL 的光学增益(optical

[0050] 的时帧,其中白色和黑色分别表示高和低电磁(EM)场强度。所仿真装置的设计与 3 图中所示的设计相似,并且图 15 还显示部分 VCL 结构 2、光栅区 11 和 ICWG 19 在硅层中的大致位置。

[0051] 如可以见到,存在从垂直激射模(图 1A 中的 16)至 ICWG 模(图 1A 中的 21)的合理耦合。

[0052] 如先前提及,可以进一步优化光从周期性光栅区 12 中的 PBG 模 17 至 GWG 18 中 GWG 模 20 的取出以减少不希望的耦合损失。可以拓扑地优化图 1B 中的连接部分 28 以最小化因光栅周期性破坏所致的散射损失。可以优化 GWG 18 的形状,使得 GWG 模 20 的色散应当

与 PBG 模 17 的模相似,以更好地模匹配。从 GWG 18 中的 GWG 模 20 至 ICWG 19 中 ICWG 模 21 的模转换的效率也可以通过拓扑优化图 1B 或 C 中的连接部分 30 加以最大化。拓扑优化的示意性实例在图 16 中显示。图 16A 和 16B 分别显示优化之前和之后的连接部分 30。

[0053] 这种拓扑优化的实例在例如 L. Yang 等人, Electronic Letters, 13, 第 923 页 (2007) 中描述,其中报道了 5dB 传输改善。

[0054] 虽然已经联系所述的实施方式描述本发明,但不应以任何方式解释为限于所提出的实例。本发明的范围将在附带的权力要求集中解释。在所述权利要求的语境下,术语“包含”或“包括”不排除其他可能的要素或步骤。同样,对称谓如“a(一个)”或“an(一种)”等的提及不应当解释为排除复数。指代符号在权利要求中基于附图中所示要素的使用也不得解释为限制本发明的范围。此外,不同权利要求项中提供的各个特征可能可以有利地组合,并且这些特征在不同权利要求项中的提及不排除特征的组合不是可能的和有利的。

[0055] 参考文献

[0056] ● Gunn, Photonics Spectra, 2006 年 3 月, 第 62-67 页

[0057] ● Fang 等人, Optics Express, 14, 第 9203 页 (2006)

[0058] ● US 2007/0153860

[0059] ● US 6, 031, 243

[0060] ● I. -S. Chung 等人, " Subwavelength Grating-Mirror VCSEL With a Thin Oxide Gap(具有薄氧化物隙的亚波长光栅镜 VCSEL) ", IEEE Photonics Technology Letters, 2(2008) 20, 第 105-107 页

[0061] ● US 2007/0201526

[0062] ● R. Jones 等人, "Grating based hybrid silicon lasers(基于光栅的混合硅激光器)", Proceedings of SPIE, 第 7230 卷, 第 72300U-1 页至第 72300U-8 页

[0063] ● WO 2005/089098

[0064] ● H. Wu 等人, "超宽带 SOI 二元闪耀光栅镜(Ultra broadband SOI binary blazed grating mirror)", 第五届 IV 族光子学 IEEE 国际大会论文集 (5th IEEE International Conference on Group IV Photonics), 第 299-301 页.

[0065] ● Huang 等人, Optics Express, 15, 1222 (2007)

[0066] ● IEEE j. selected topics in Quant. Electron. 13, 374 (2007)

[0067] ● IEEE Photon. Technol. Lett. 18, 688 (2006)

[0068] ● L. Yang, 等人, Electronic Letters, 13, 第 923 页 (2007)

[0069] ● WO 2008/068209

[0070] ● US 2007/0201526

[0071] ● Ferrier L. 等人: " Vertical microcavities based on photonic crystal mirrors for III-V/Si integrated microlasers(用于 III-V/Si 集成微激光器的基于光子晶体镜的垂直微腔) "; Proc. of the SPIE, 第 6989 卷, 2008 年, 第 69890W-1-69890W-12 页

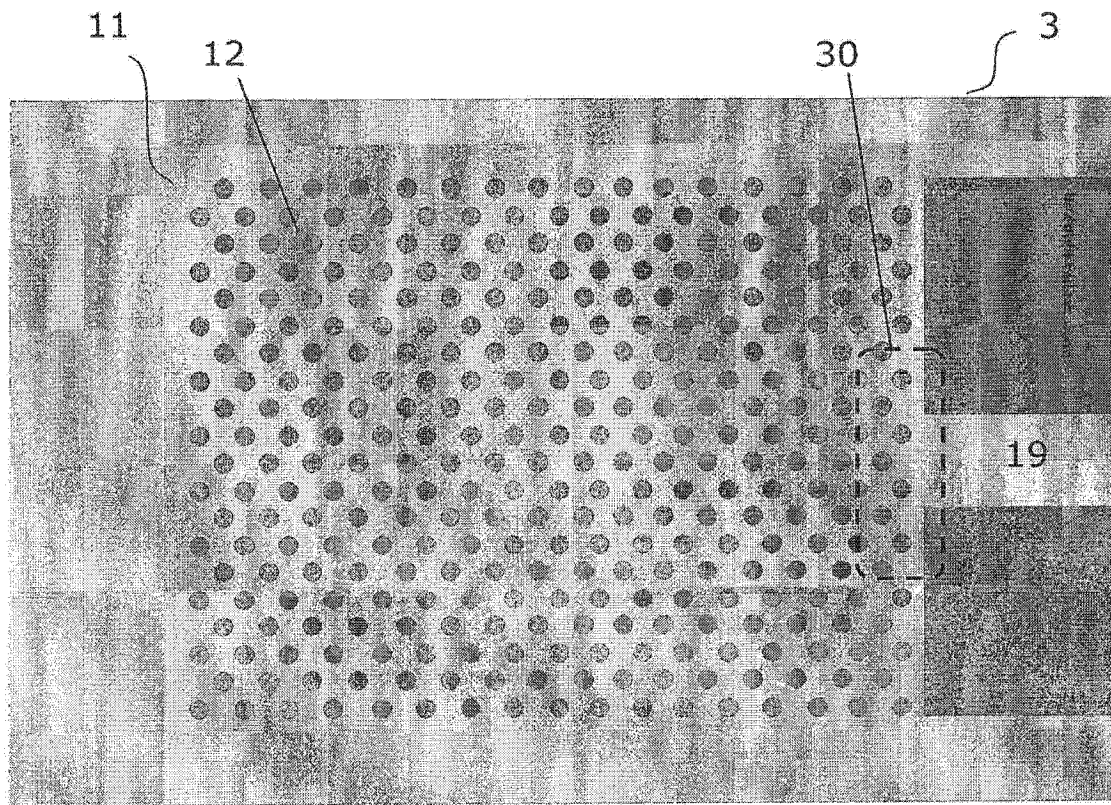


图 1C

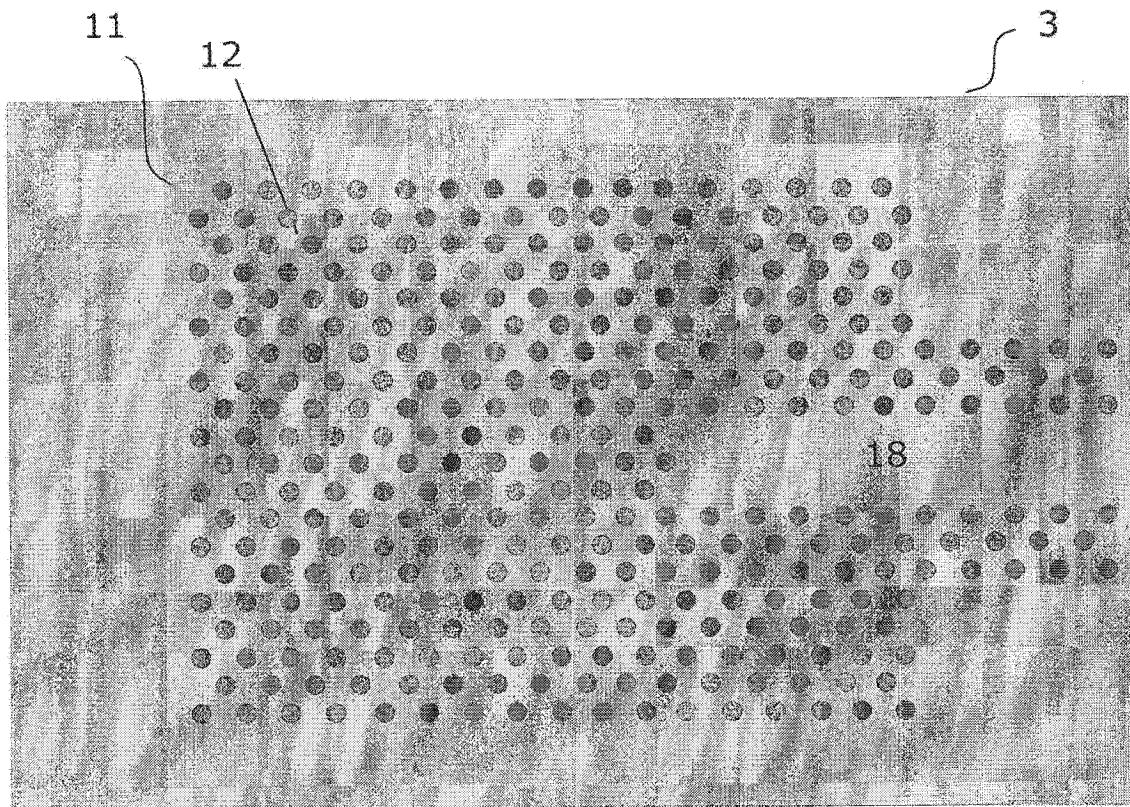


图 1D

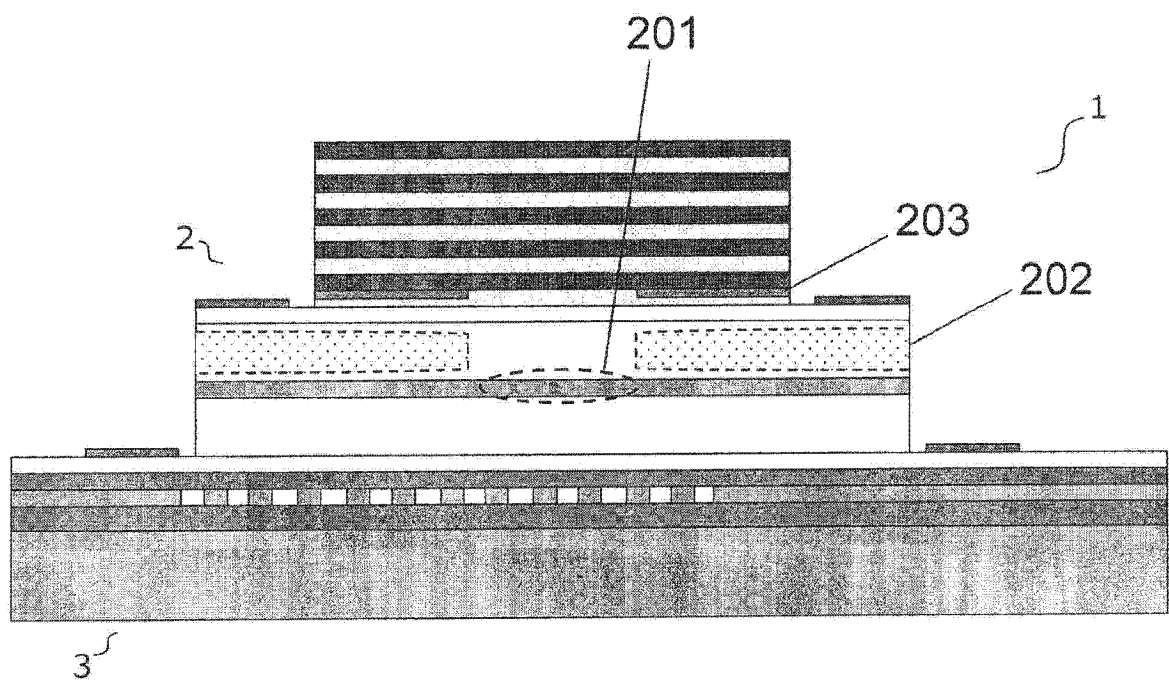


图 2

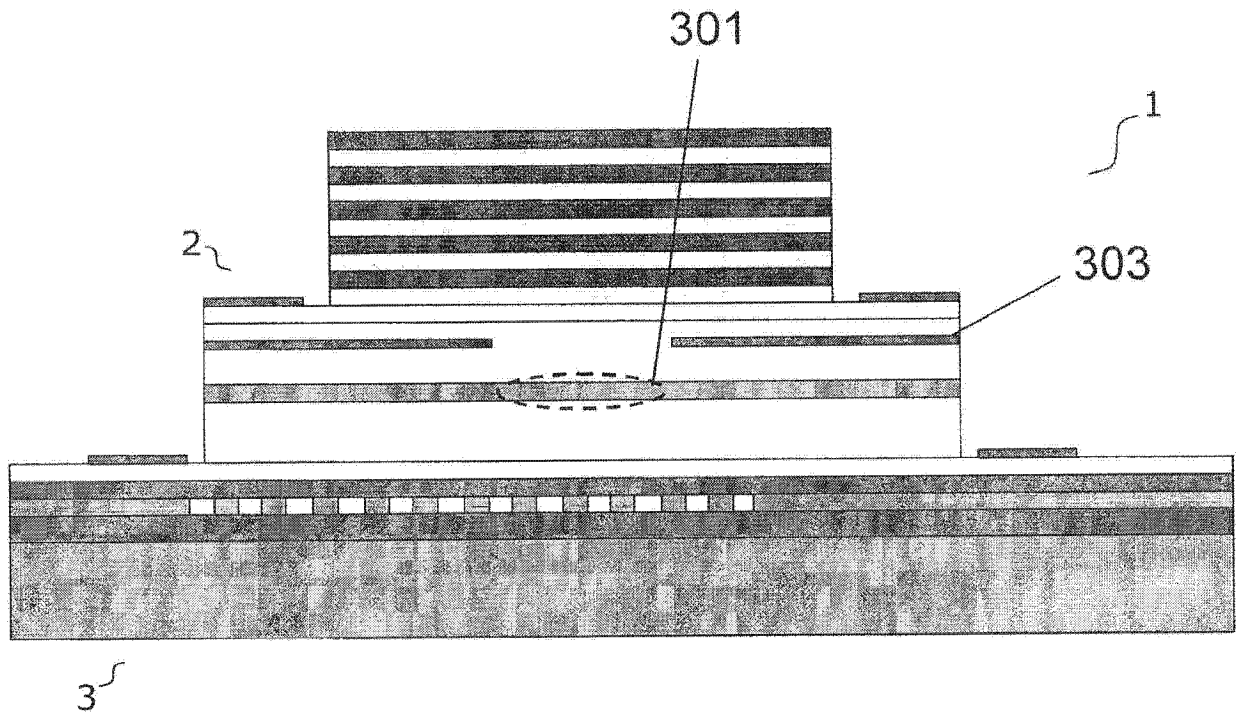


图 3

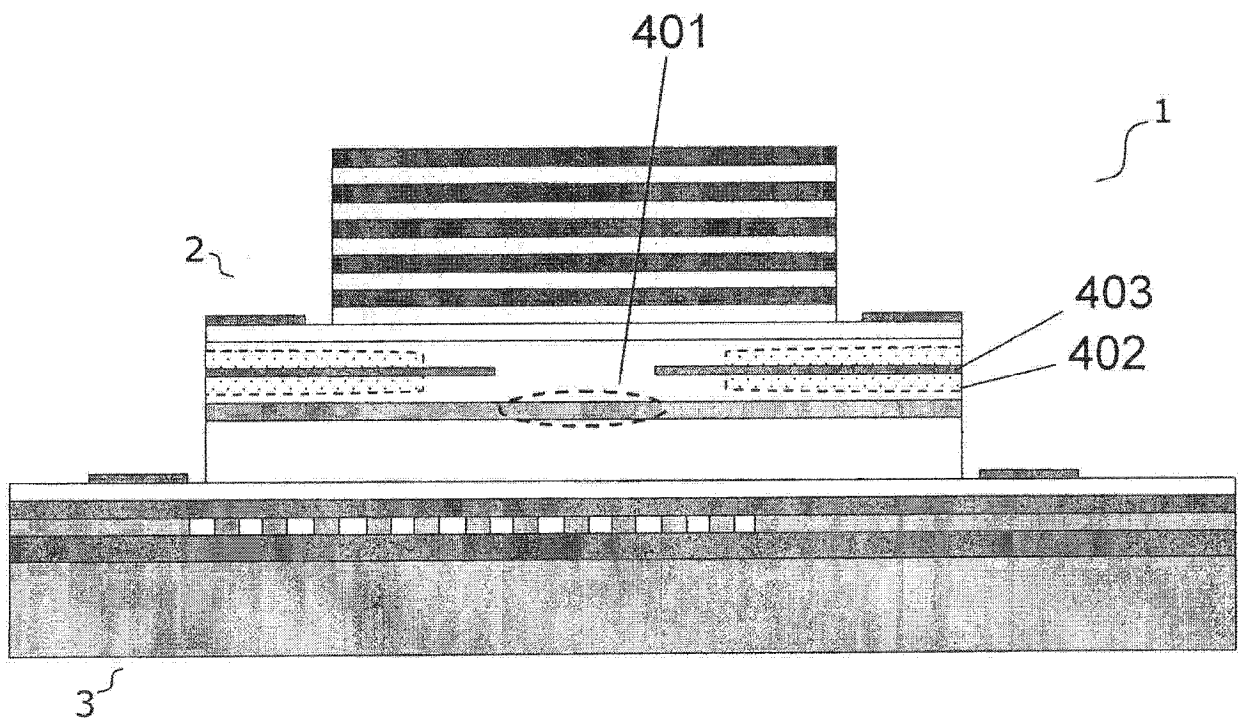


图 4

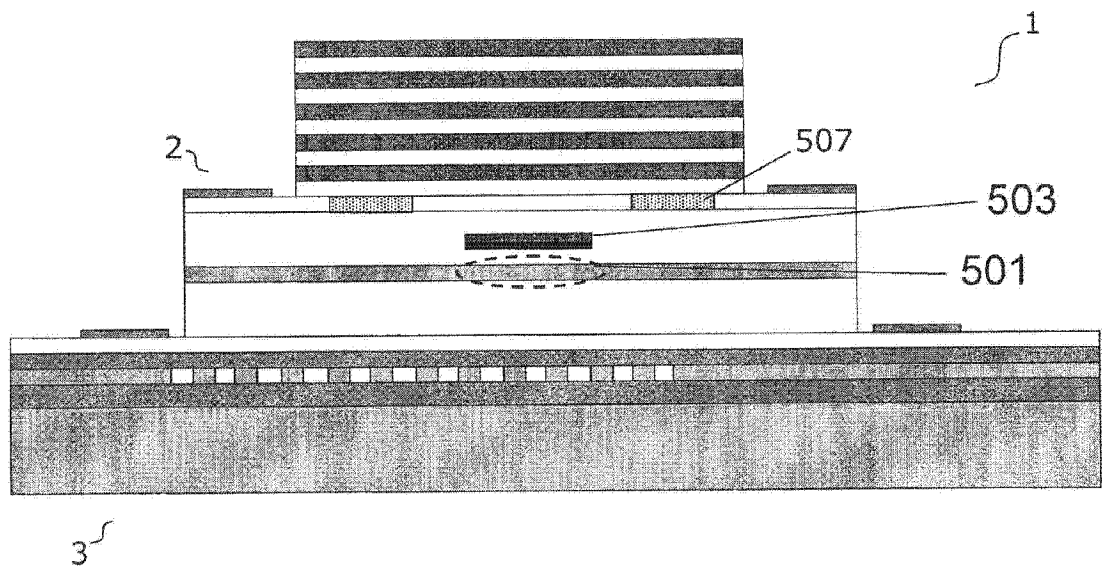


图 5

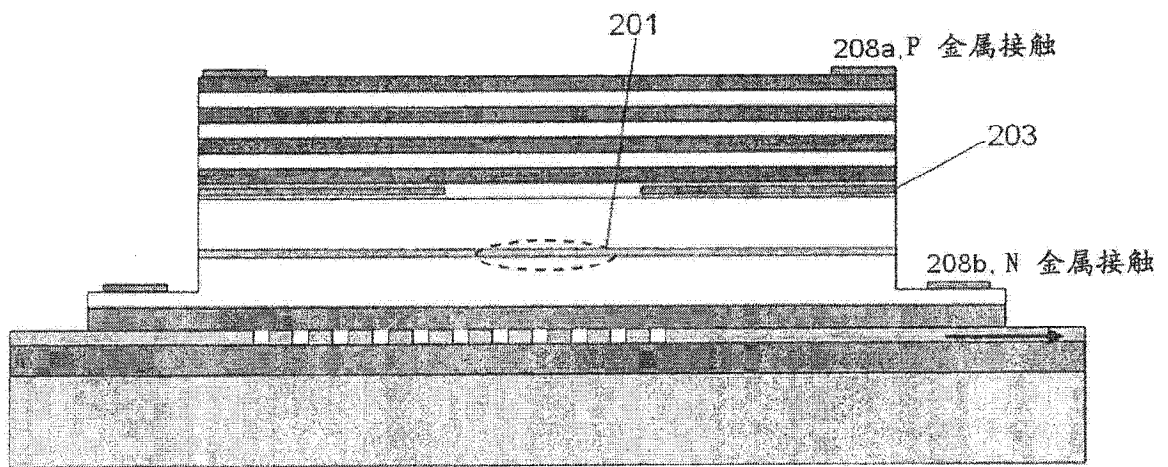


图 6

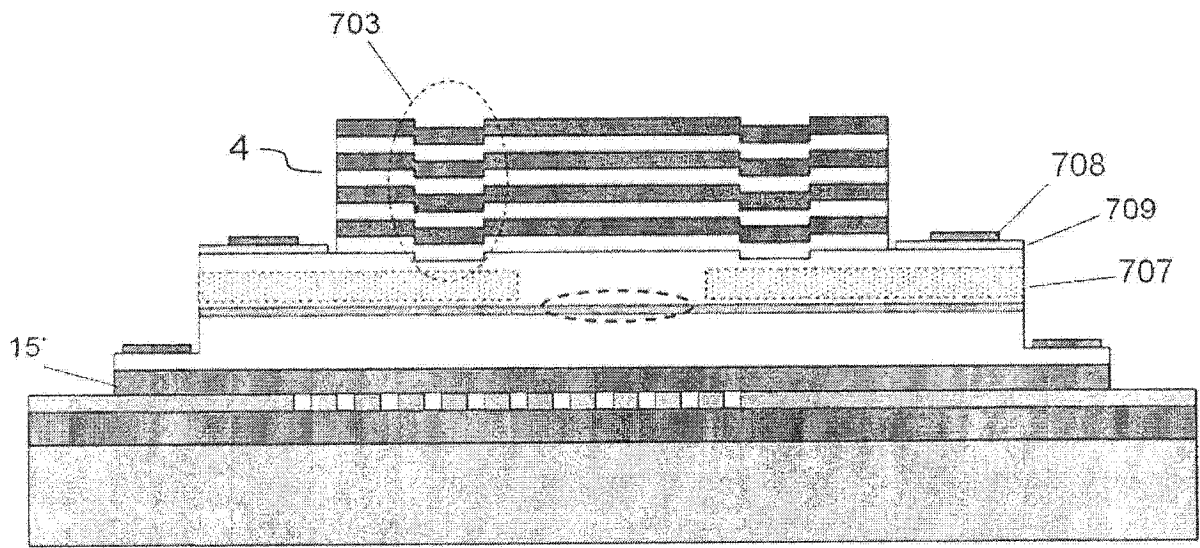


图 7A

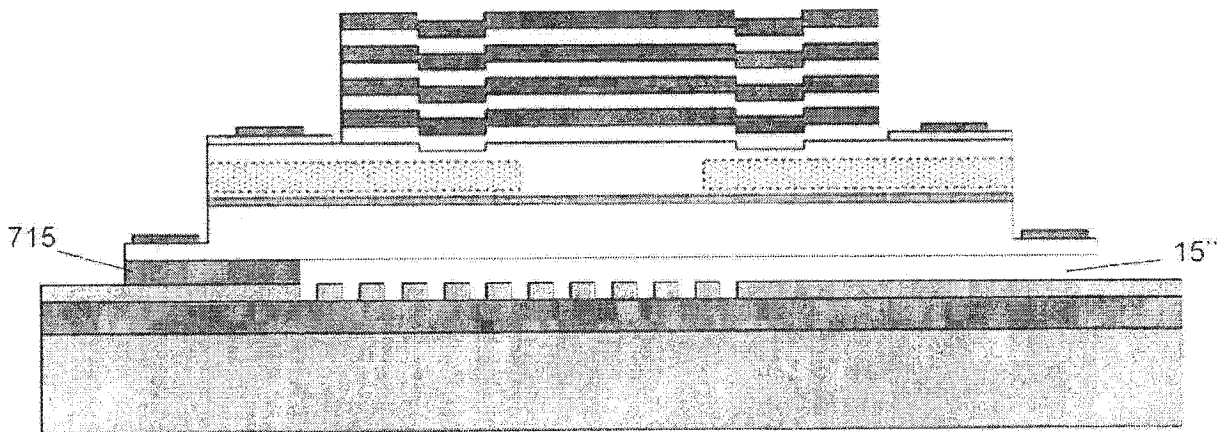


图 7B

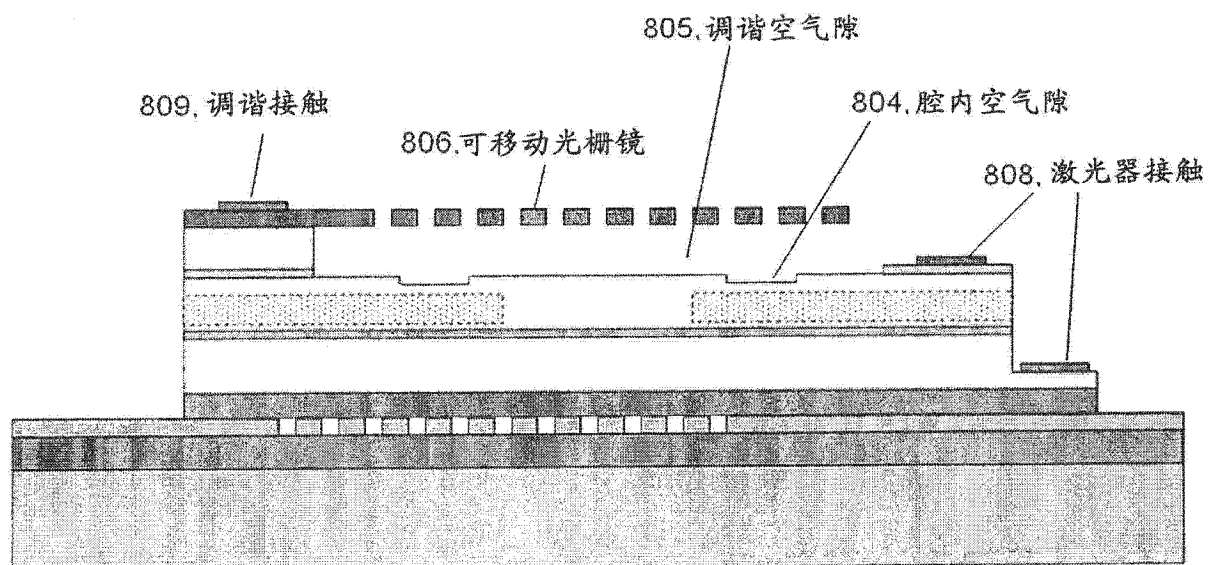


图 8

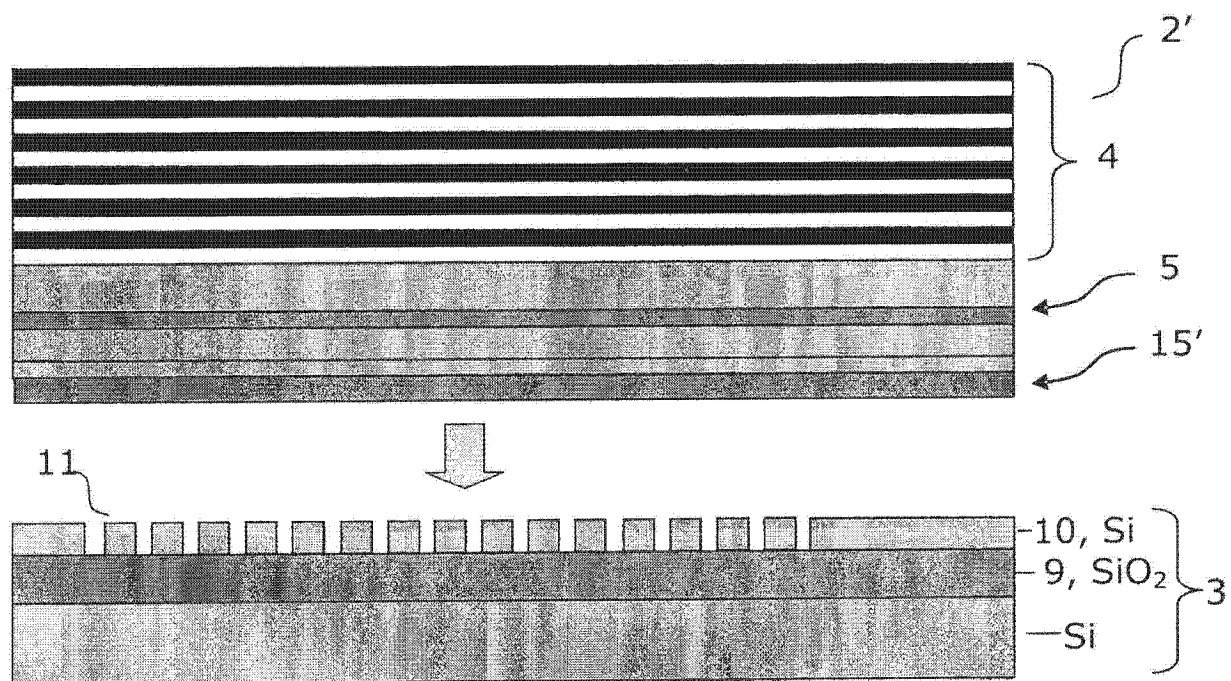


图 9A

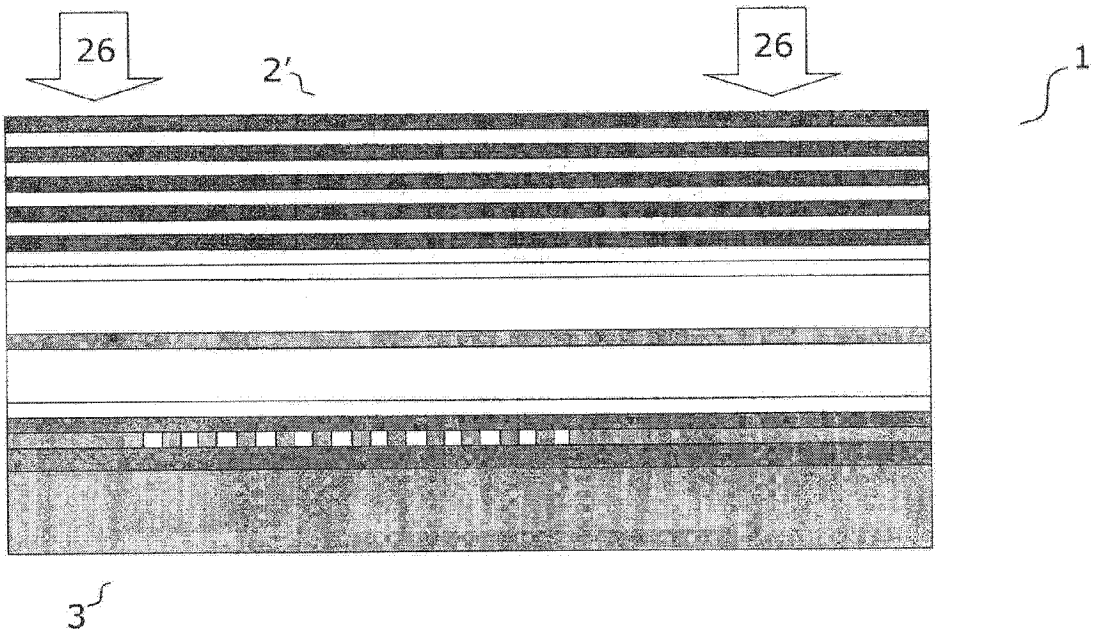


图 9B

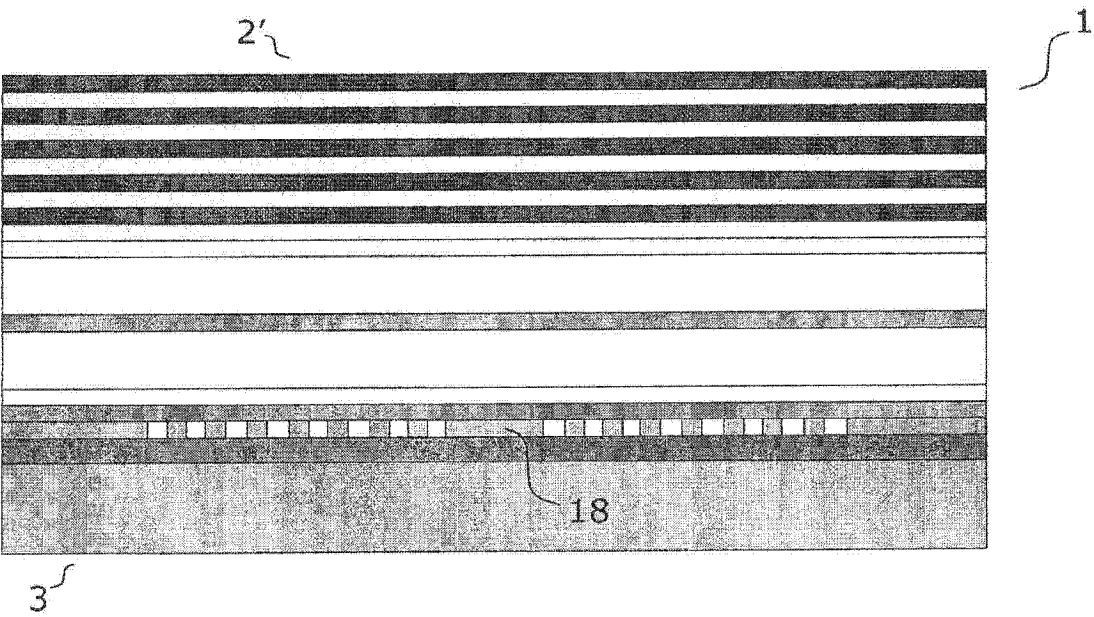


图 9C

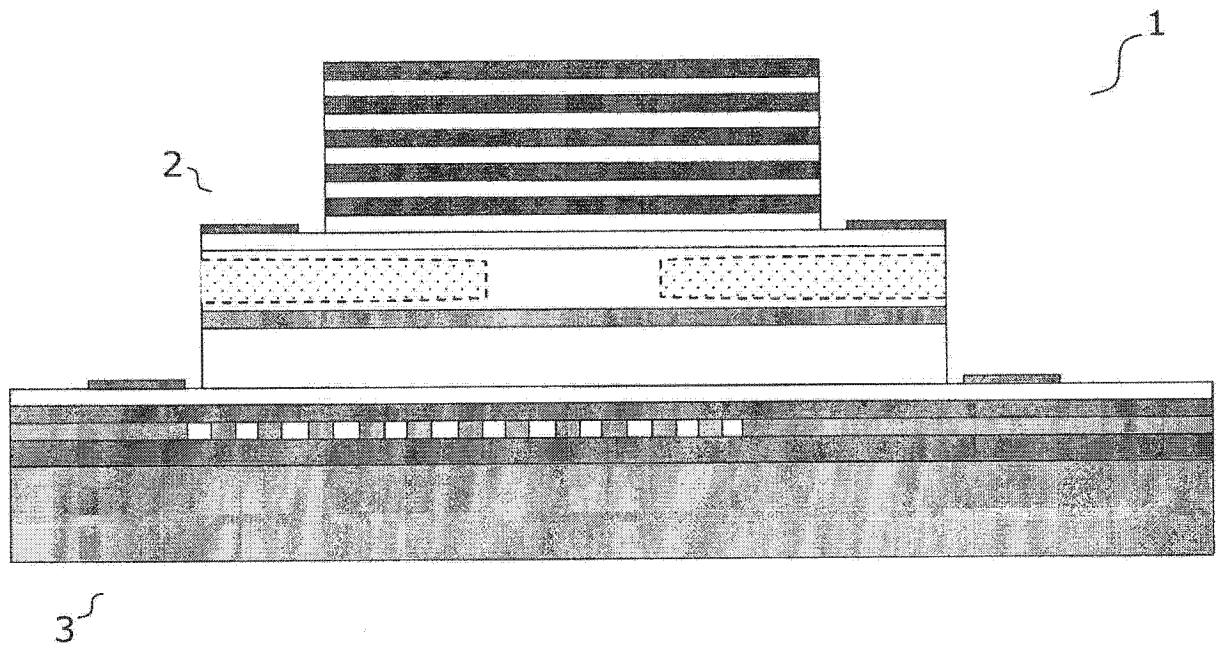


图 9D

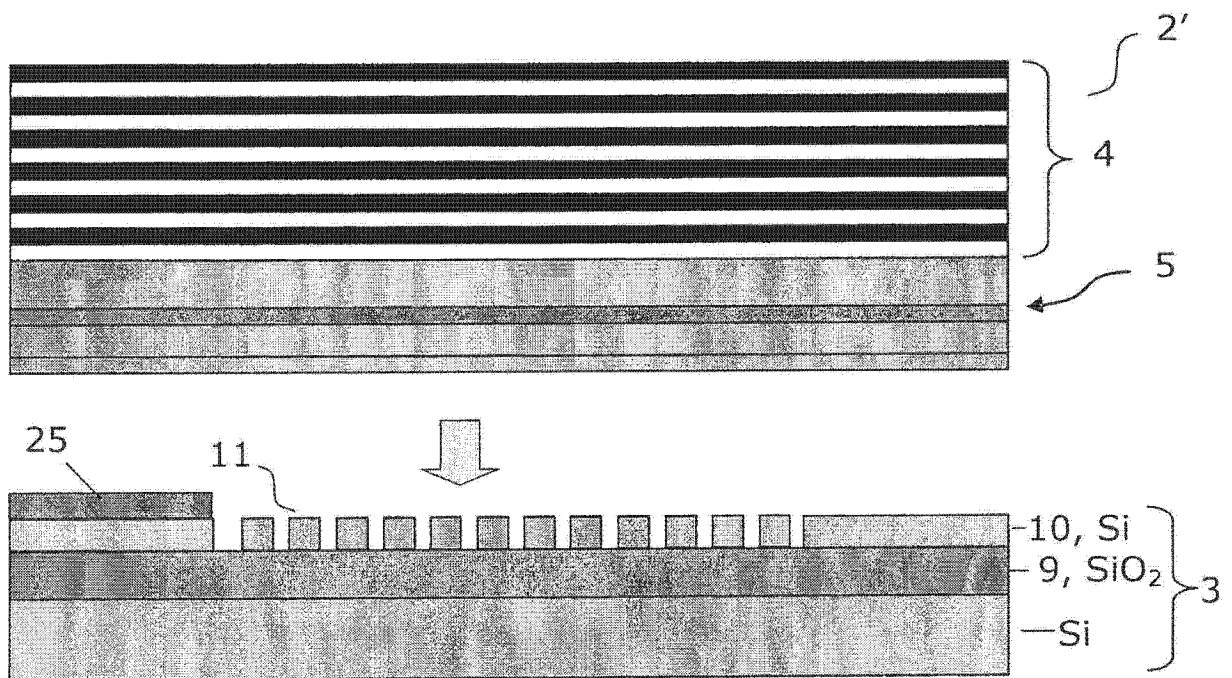


图 10A

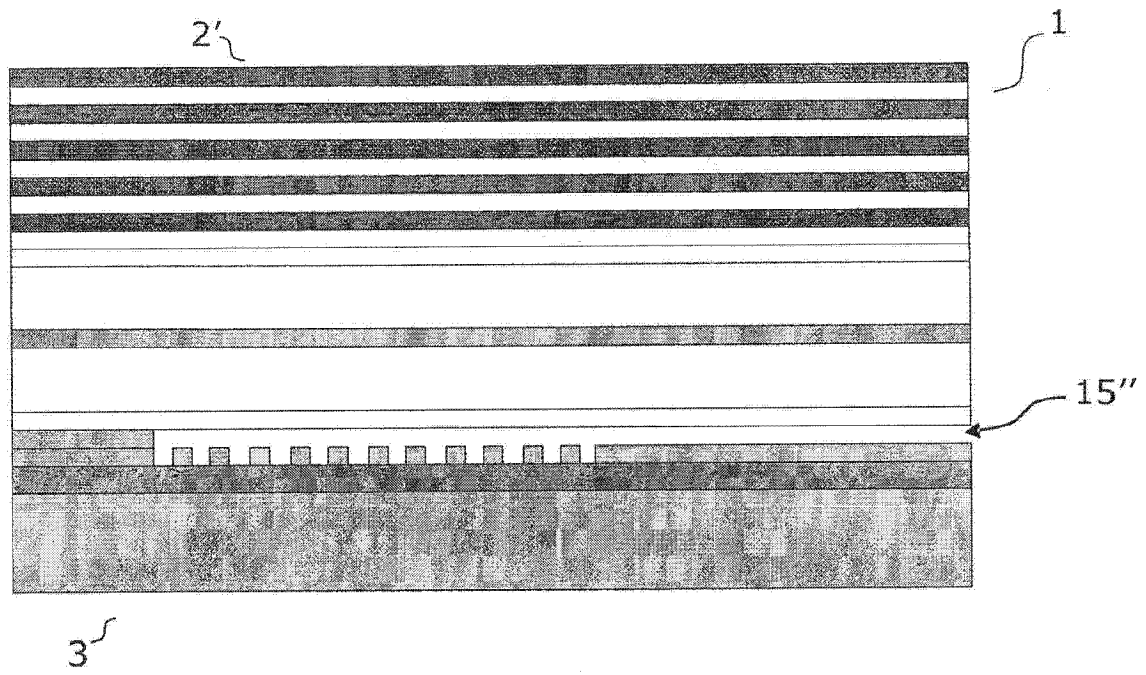


图 10B

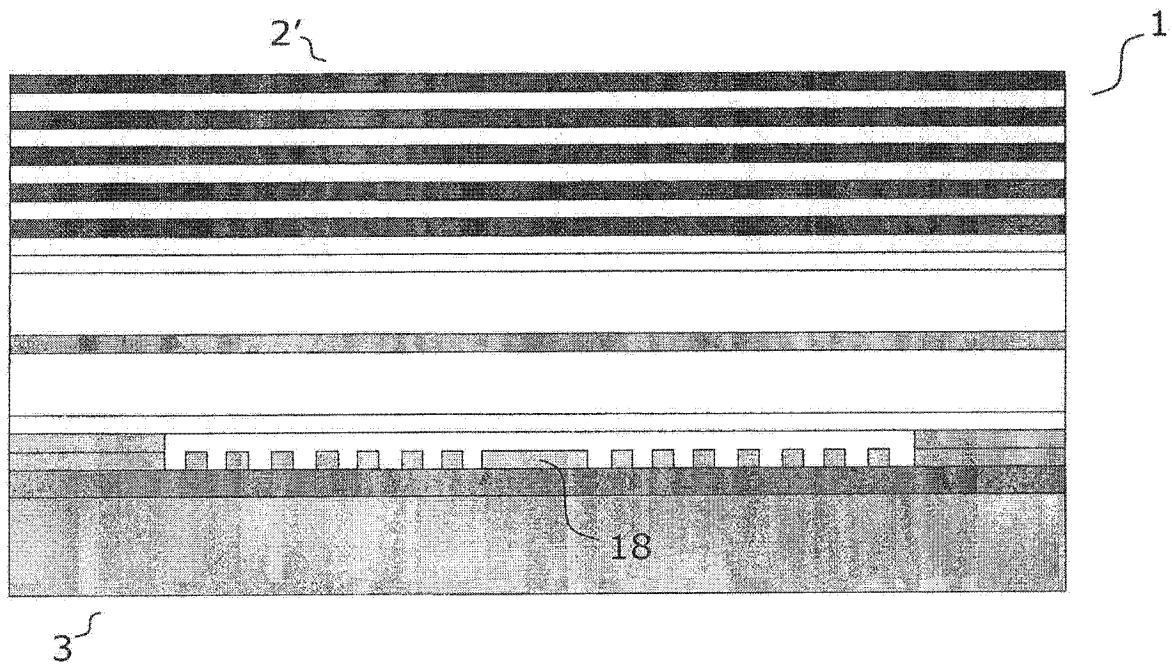


图 10C

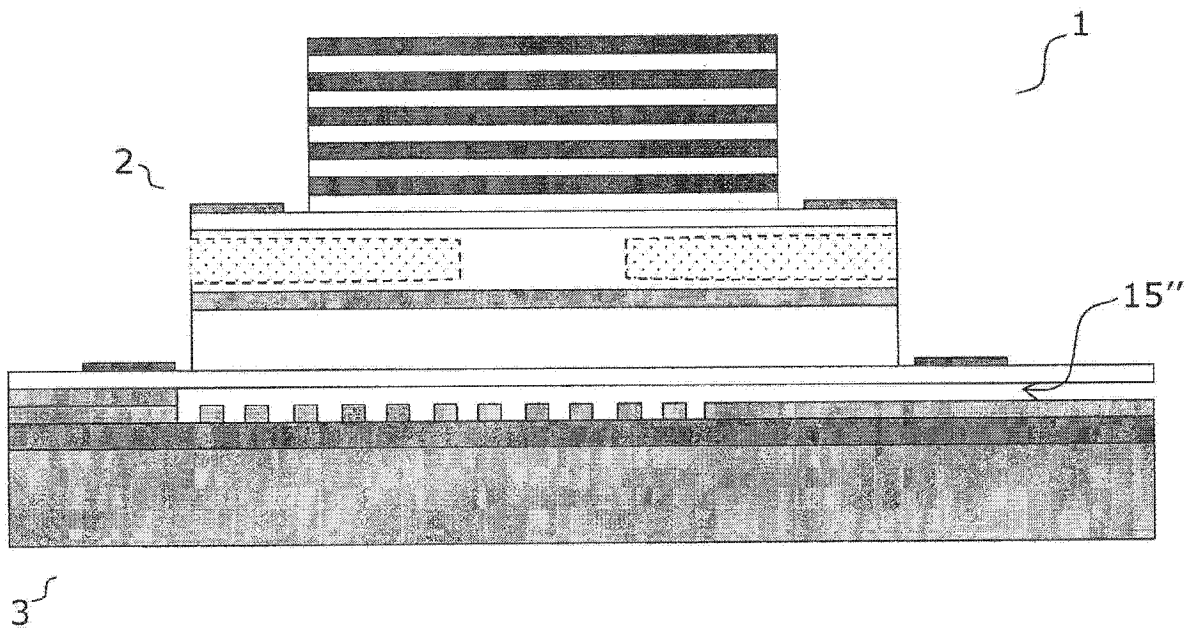


图 10D

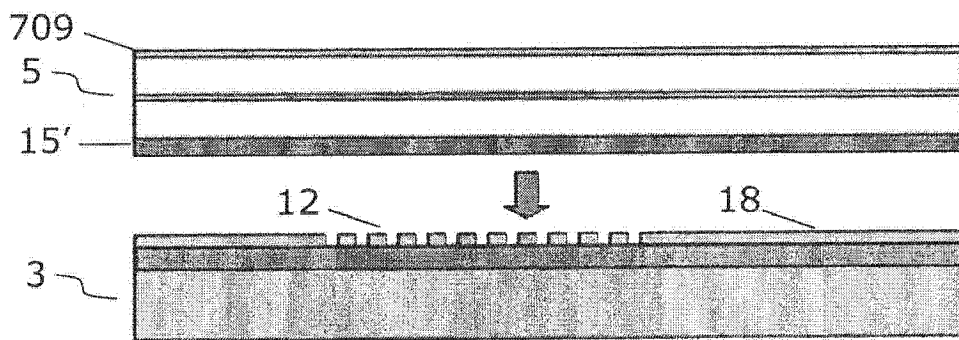


图 11A

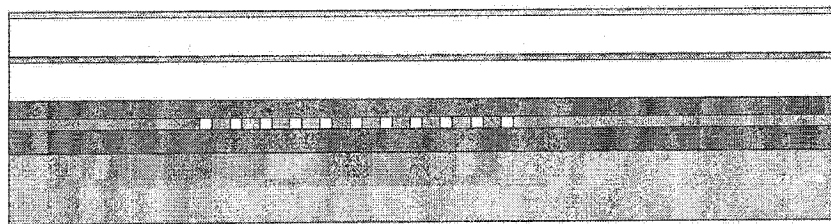


图 11B

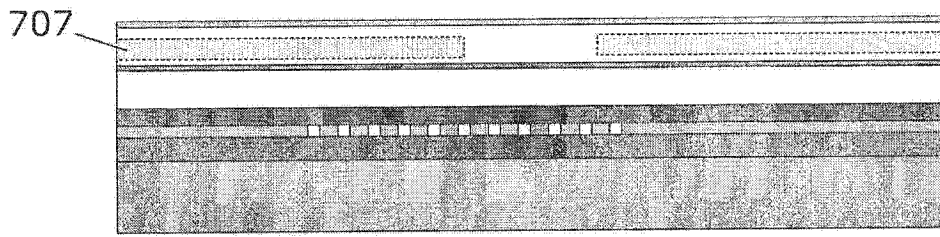


图 11C

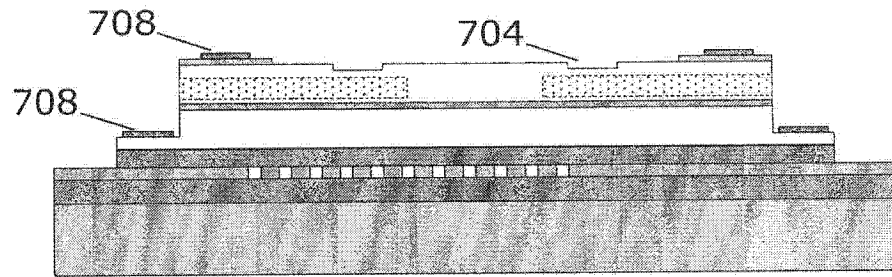


图 11D

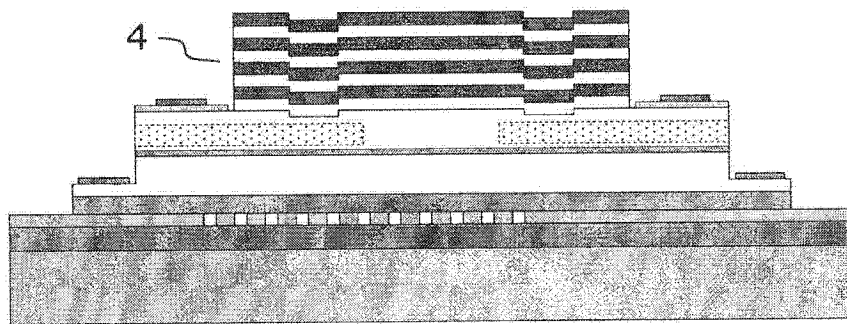


图 11E

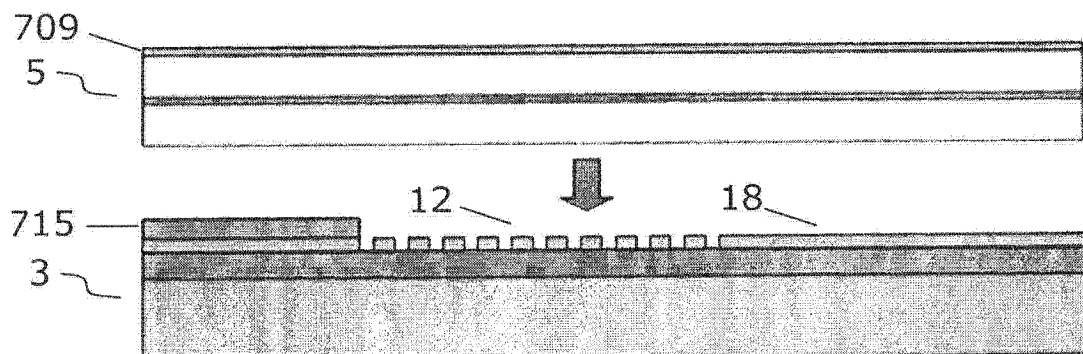


图 12A

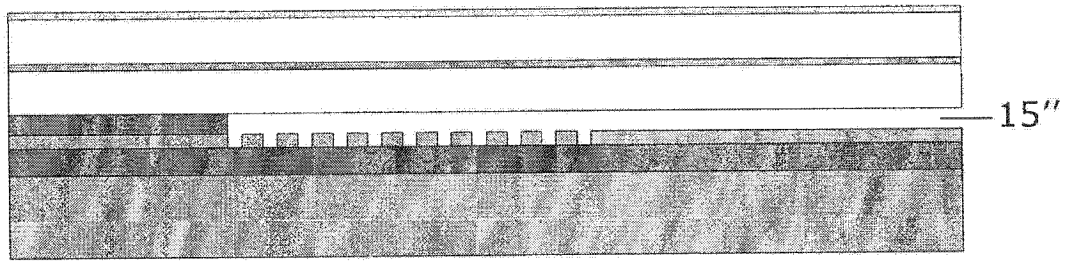


图 12B

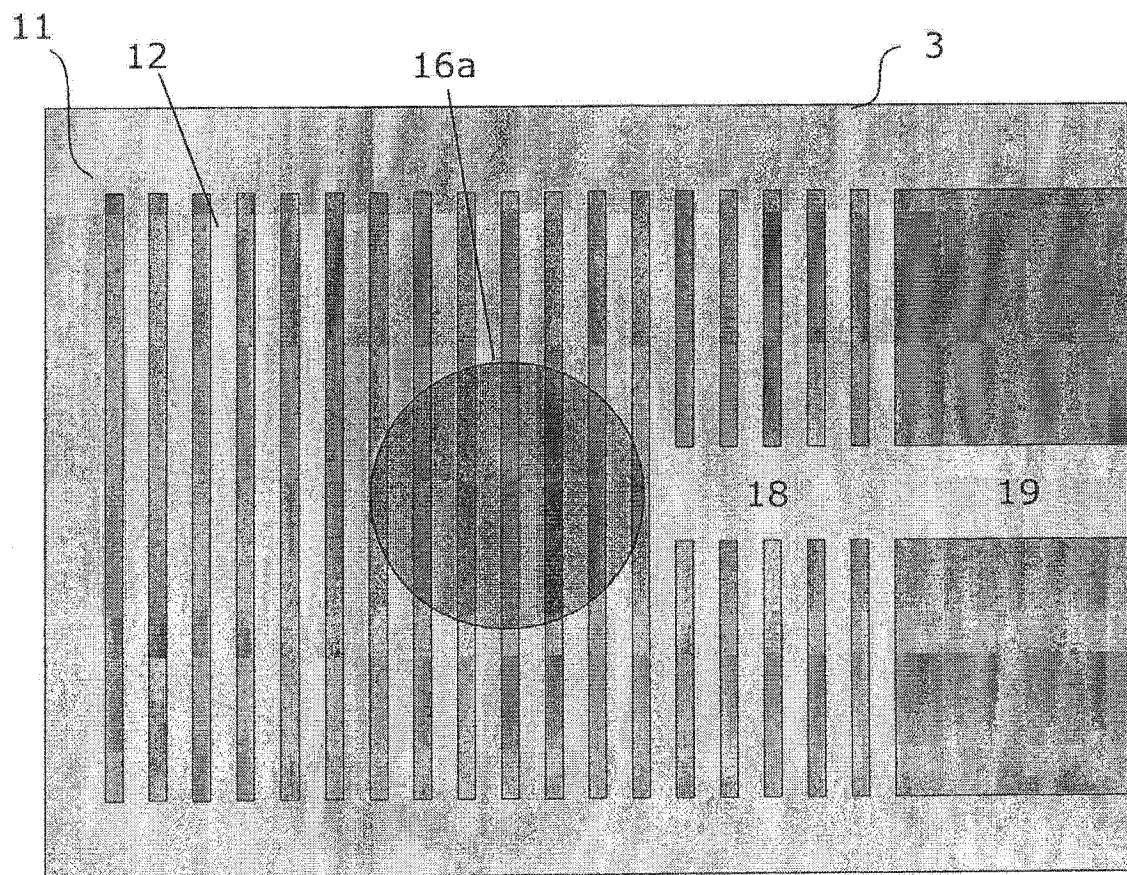


图 13

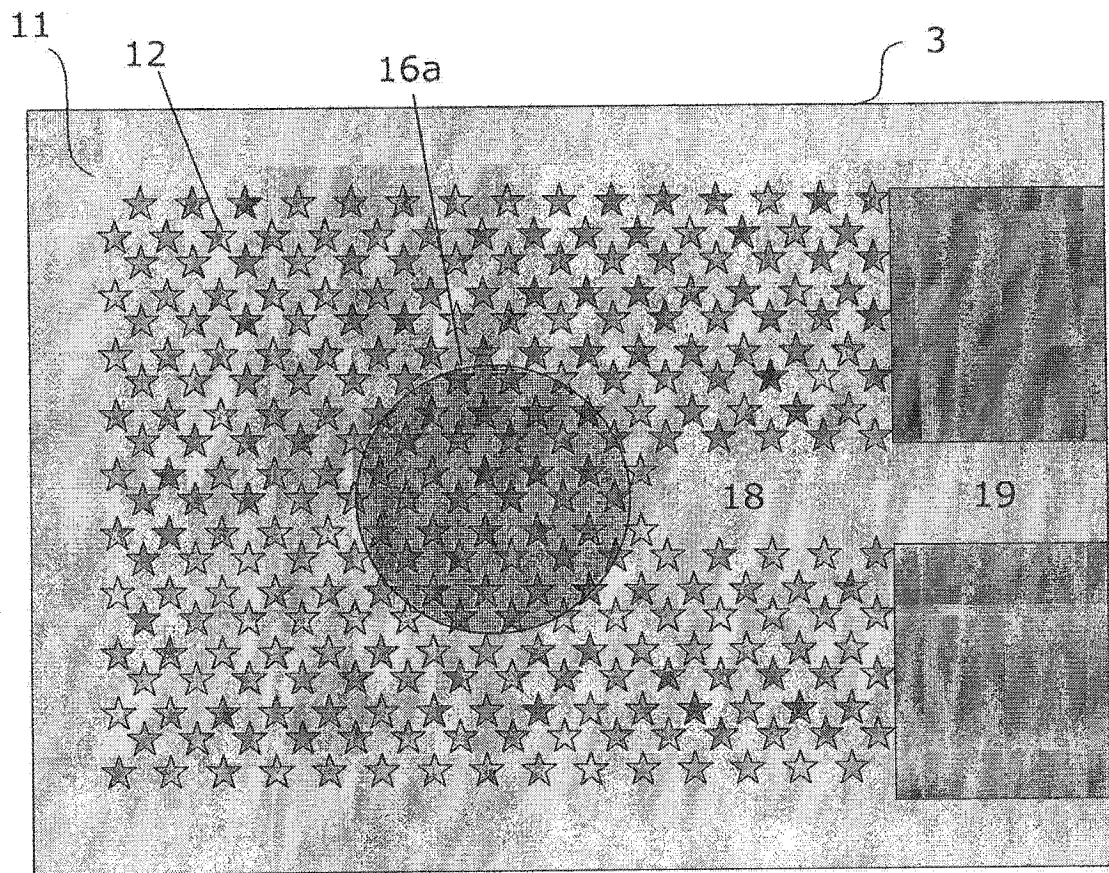


图 14

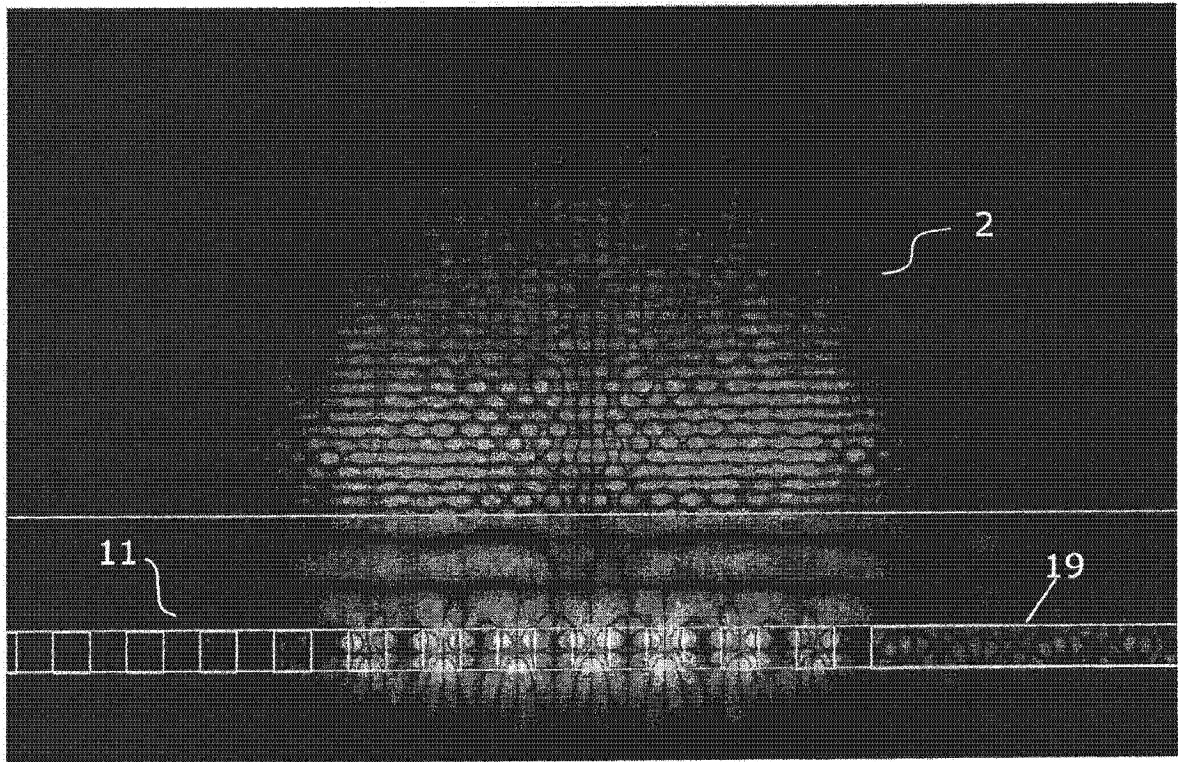


图 15

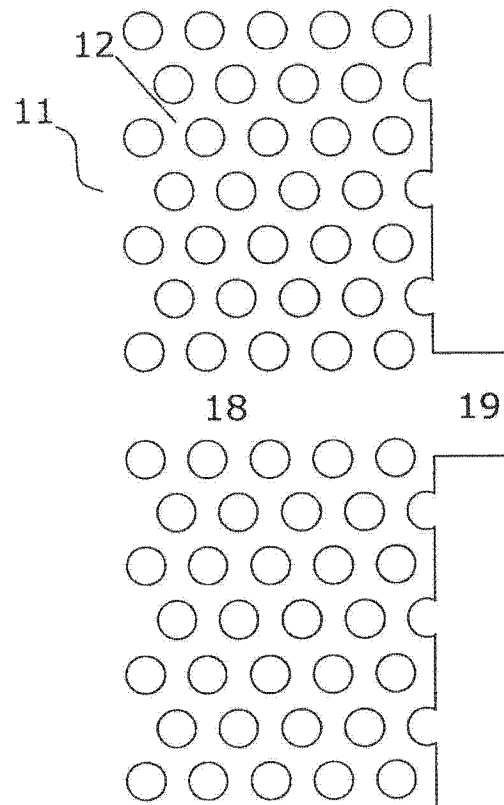


图 16A

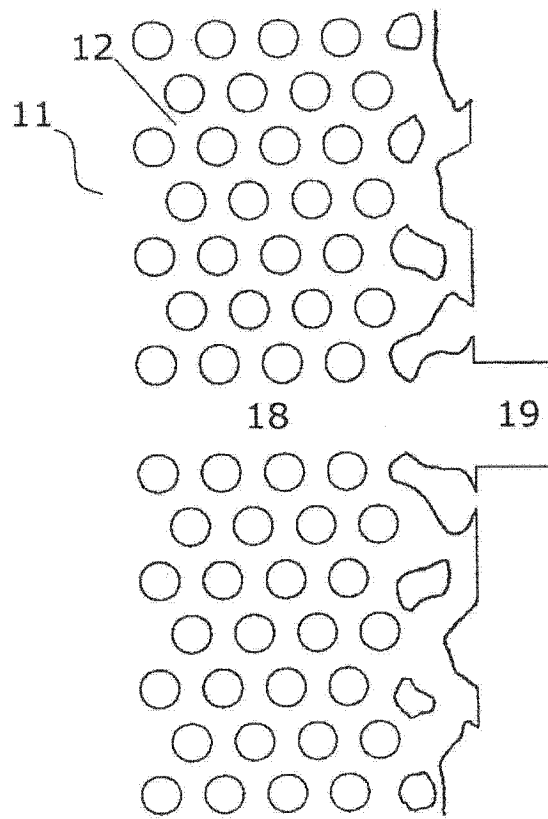


图 16B