



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107851966 B

(45)授权公告日 2020.09.15

(21)申请号 201680038974.6

(22)申请日 2016.03.09

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107851966 A

(43)申请公布日 2018.03.27

(30)优先权数据
102015110515.2 2015.06.30 DE

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.12.29

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2016/055019 2016.03.09

(87)PCT国际申请的公布数据
W02017/001062 DE 2017.01.05

(73)专利权人 柏林合作研究学会
地址 德国柏林

(72)发明人 约尔格·弗里克 格茨·埃伯特
保罗·柯如姆 乔纳森·德克

(74)专利代理机构 北京市立方律师事务所
11330

代理人 李娜

(51)Int.Cl.
H01S 5/12(2006.01)
H01S 5/20(2006.01)

(56)对比文件
US 6577660 B1,2003.06.10
JP 特开平10-223967 A,1998.08.21
US 5659562 A,1997.08.19
CN 104078842 A,2014.10.01
US 5040188 A,1991.08.13
US 2004/0001522 A1,2004.01.01

审查员 王晓东

权利要求书3页 说明书12页 附图11页

(54)发明名称

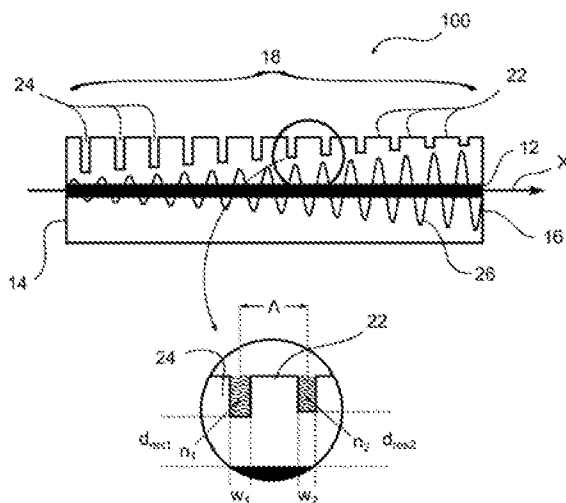
具有分布式反馈的激光二极管及其生产方法

(57)摘要

本发明涉及一种激光二极管(100),该激光二极管(100)包括:有源层(10);波导区域(12),该波导区域(12)至少部分围绕该有源层(10);后端面(14);前端面(16),该前端面(16)被设计用于使激光辐射出耦,其中,该有源层(10)至少部分地沿着第一轴线(X)在该后端面(14)与该前端面(16)之间延伸;以及光栅(18),该光栅(18)可操作地连接到该波导区域(12),其中,该光栅(18)包括多个脊(22)和多个沟槽(24),其特征在于,该多个沟槽(24)被设计为使得沿着该光栅(18)的该多个沟槽(24)的耦合参数P的平均增量是非零,其中,该沟槽(24)的耦合参数P通过公式

(1) $P = \frac{\Delta n}{w d_{res}}$ 来定义,其中,d_{res}是该沟槽(24)到该有源层(10)的距离,w是该沟槽(24)的宽度,并且 Δn是该沟槽(24)的折射率与围绕该沟槽

(24)的材料的折射率之间的折射率差。特别地,本发明涉及一种激光二极管,其中分布式反馈通过高阶的表面光栅而出现同时辐射在一个面上被出耦,并且其中该光栅的耦合强度与在该激光二极管中引导的波的功率密度匹配。



1. 激光二极管 (100), 所述激光二极管 (100) 包括:

有源层 (10);

波导区域 (12), 所述波导区域 (12) 至少部分围绕所述有源层 (10);

后端面 (14);

前端面 (16), 所述前端面 (16) 被设计用于使激光辐射输出耦合, 其中, 所述有源层 (10) 至少部分地沿着第一轴线 (X) 在所述后端面 (14) 与所述前端面 (16) 之间延伸; 以及

栅格 (18), 所述栅格 (18) 可操作地连接到所述波导区域 (12), 其中, 所述栅格 (18) 包括多个脊 (22) 和多个沟槽 (24), 其中, 所述栅格 (18) 是阶数在 10 与 100 之间的范围内的表面栅格,

其中,

所述多个沟槽 (24) 被设计为使得沿着所述栅格 (18) 的所述多个沟槽 (24) 的耦合参数 P 的平均增量非零, 其中, 沟槽 (24) 的所述耦合参数 P 通过公式 (1) 来定义

$$P = \frac{\Delta n}{w d_{res}} \quad (1)$$

其中, d_{res} 是所述沟槽 (24) 到所述有源层 (10) 的距离, w 是所述沟槽 (24) 的宽度, 并且 Δn 是所述沟槽 (24) 的折射率与围绕所述沟槽 (24) 的材料的折射率之间的折射率差。

2. 根据权利要求 1 所述的激光二极管 (100), 其中, 所述栅格 (18) 具有关于所述耦合参数 P 的大于或等于 1.1 的变迹度量 A_P , 其中, 所述变迹度量 A_P 根据公式 (2)

$$A_P = \frac{\text{Maximum}\{P\}}{\text{Minimum}\{P\}} \quad (2)$$

由所述栅格 (18) 的所述多个沟槽 (24) 的所述耦合参数 P 的最大值与最小值之间的比值产生。

3. 根据权利要求 1 所述的激光二极管 (100), 其中, 所述栅格 (18) 具有关于局部反射率 $R(x)$ 大于或等于 1.1 的变迹度量 A_R , 其中, 所述变迹度量 A_R 根据公式 (3)

$$A_R = \frac{\text{Maximum}\{R(x)\}}{\text{Minimum}\{R(x)\}} \quad (3)$$

由所述栅格 (18) 的所述局部反射率 $R(x)$ 的最大值与最小值之间的比值产生。

4. 根据权利要求 1 所述的激光二极管 (100), 其中, 所述栅格具有关于局部耦合因子长度积 κL 大于或等于 1.1 的变迹度量 $A_{\kappa L}$, 其中, 所述变迹度量 $A_{\kappa L}$ 根据公式 (4)

$$A_{\kappa L} = \frac{\text{Maximum}\{\kappa L(x)\}}{\text{Minimum}\{\kappa L(x)\}} \quad (4)$$

由所述栅格 (18) 的所述局部耦合因子长度积 $\kappa L(x)$ 的最大值与最小值之间的比值产生。

5. 根据权利要求 1 到 4 中的任一项所述的激光二极管 (100), 其中, 各个沟槽 (24) 的所述耦合参数 P 与在所述波导区域 (12) 中引导的波 (26) 的功率密度适配, 其中, 与低功率密度的区域中的所述耦合参数 P 相比, 所述耦合参数 P 在高功率密度的区域中减小。

6. 根据权利要求 1 到 4 中的任一项所述的激光二极管 (100), 其中, 所述耦合参数 P 沿着所述栅格 (18) 的函数关系是任意的、单调增加或单调减小、线性增加或线性减小、二次增加或二次减小或者指数增加或指数减小。

7. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 根据公式(5)

$$V_{dres} = \frac{\text{Maximum}\{d_{res}\}}{\text{Minimum}\{d_{res}\}} \quad (5)$$

由各个沟槽(24)到所述有源层(10)的距离 d_{res} 的最大值与最小值之比得出的变化 V_{dres} 大于或等于1.1。

8. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 根据公式(6)

$$V_w = \frac{\text{Maximum}\{w\}}{\text{Minimum}\{w\}} \quad (6)$$

由各个沟槽(24)的所述宽度 w 的最大值与最小值之比得出的变化 V_w 大于或等于1.1。

9. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 根据公式(7)

$$V_{\Delta n} = \frac{\text{Maximum}\{\Delta n\}}{\text{Minimum}\{\Delta n\}} \quad (7)$$

由单个沟槽(24)的相应折射率与围住所述沟槽(24)的所述材料的所述折射率之间的折射率差 Δn 的最大值与最小值之比得出的变化 $V_{\Delta n}$ 大于或等于1.1。

10. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 所述栅格(18)的长度 L 大于或等于 $100\mu\text{m}$ 或者与沿着所述第一轴线(X)在所述后端面(14)与所述前端面(16)之间的距离的至少10%相对应。

11. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 所述栅格在整个谐振器长度上方延伸或者被划分成至少两个子光栅, 其中, 沿着所述第一轴线(X)在所述后端面(14)与所述前端面(16)之间的所述至少两个子光栅任意地分布。

12. 根据权利要求11所述的激光二极管(100), 其中, 所述栅格(18)的所述沟槽(24)完全地或部分地位于光学增益区或无光学增益区中。

13. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 所述多个沟槽(24)等距间隔开。

14. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 在所述沟槽(24)中的至少一个沟槽(24)处所述沟槽(24)的宽度 w 在所述有源层(10)方向上逐渐变细。

15. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 所述沟槽(24)的壁具有不同的轮廓。

16. 根据权利要求1到4中的任一项所述的激光二极管(100), 其中, 沿着垂直于所述第一轴线(X)延伸的第二轴线(Y)的各个沟槽(24)的所述耦合参数 P 取决于位置, 并且沟槽(24)的取决于位置的所述耦合参数 P 适合于在所述波导区域(12)中引导的波(26)的功率密度, 并且其中, 与低功率密度区域中的所述沟槽(24)的取决于位置的耦合参数 P 的值相比, 所述沟槽(24)的取决于位置的耦合参数 P 的值在高功率密度区域中减小。

17. 用于生产激光二极管(100)的方法, 所述方法包括:

提供有源层(10)和至少部分地围绕所述有源层(10)的波导区域(12);

形成后端面(14)和适于耦合出激光辐射的前端面(16), 其中, 所述有源层(10)至少部分地沿着第一轴线(X)在所述后端面(14)与所述前端面(16)之间延伸; 以及

形成具有多个脊(22)和多个沟槽(24)的栅格(18), 使得所述栅格(18)可操作地连接到所述波导区域(12), 其中, 所述栅格(18)是阶数在10与100之间的范围内的表面栅格,

其中，

所述多个沟槽 (24) 被设计为使得针对所述多个沟槽 (24) 的变迹A的至少一个尺度值大于或等于1.1。

18. 根据权利要求17所述的用于生产激光二极管 (100) 的方法, 还包括:

对所述波导区域 (12) 应用具有多个开口 (32) 的蚀刻掩模 (30), 其中所述开口 (32) 的宽度沿着第一轴线 (X) 和/或第二轴线 (Y) 局部地变化; 以及

通过蚀刻工艺来图案化被掩蔽的所述波导区域 (12)。

19. 根据权利要求18所述的用于生产激光二极管 (100) 的方法, 其中, 所述蚀刻工艺是各向异性反应离子蚀刻。

20. 激光二极管 (100), 所述激光二极管 (100) 包括:

有源层 (10);

波导区域 (12), 所述波导区域 (12) 至少部分围绕所述有源层 (10);

后端面 (14);

前端面 (16), 所述前端面 (16) 被设计用于使激光辐射输出耦合, 其中, 所述有源层 (10) 至少部分地沿着第一轴线 (X) 在所述后端面 (14) 与 said 前端面 (16) 之间延伸; 以及

栅格 (18), 所述栅格 (18) 可操作地连接到所述波导区域 (12), 其中, 所述栅格 (18) 包括多个脊 (22) 和多个沟槽 (24),

其中,

所述多个沟槽 (24) 被设计为使得沿着所述栅格 (18) 的所述多个沟槽 (24) 的耦合参数P的平均增量非零, 其中, 沟槽 (24) 的所述耦合参数P通过公式 (8) 来定义

$$P = \frac{\Delta n}{w d_{\text{res}}} \quad (8)$$

其中, d_{res} 是所述沟槽 (24) 到所述有源层 (10) 的距离, w 是所述沟槽 (24) 的宽度, 并且 Δn 是所述沟槽 (24) 的折射率与围绕所述沟槽 (24) 的材料的折射率之间的折射率差, 其中, 所述栅格的强度沿纵向轴线的变化是二次增加, 并且其中, 所述栅格 (18) 具有关于局部反射率 $R(x)$ 或局部耦合因子长度积 $\kappa L(x)$ 的大于或等于3的变迹度量A, 其中, 根据公式 (9) 和公式 (10)

$$A_R = \frac{\text{Maximum}\{R(x)\}}{\text{Minimum}\{R(x)\}} \quad (9)$$

$$A_{\kappa L} = \frac{\text{Maximum}\{\kappa L(x)\}}{\text{Minimum}\{\kappa L(x)\}} \quad (10)$$

由所述栅格 (18) 的所述局部反射率 $R(x)$ 的最大值与最小值之比或所述栅格 (18) 的所述局部耦合因子长度积 $\kappa L(x)$ 的最大值与最小值之比分别得出所述变迹度量A。

具有分布式反馈的激光二极管及其生产方法

技术领域

[0001] 本发明涉及具有分布式反馈的激光二极管及其生产方法。特别地,本发明涉及一种激光二极管及其生产方法,其中分布式反馈通过高阶的表面栅格而出现同时辐射优选地在—个面上被输出耦合,并且其中栅格的耦合强度与在激光二极管中引导的波的功率密度适配。

背景技术

[0002] 具有分布式反馈的激光二极管(也被称为分布式反馈或DFB激光二极管)是单片构造的频率稳定的激光光源。与具有外腔或DBR(Distributed Bragg Reflector,分布式布拉格反射器)激光二极管的二极管激光器对比,在具有分布式反馈的激光二极管中,频率选择性元件单片地连接到激光谐振器并且在辐射产生期间已经与激光谐振器相互作用。该频率选择性元件通常是紧邻有源层的布拉格栅格,该频率选择性元件被设计为表面栅格并且直接与所产生的辐射场相互作用。

[0003] 具有分布式反馈的激光二极管的主要优点是其单片构造,由此可以实现紧凑且稳定的二极管激光器结构。近年来在设计方面和材料质量方面的改进已经导致这种二极管激光器概念的实现方面的巨大进步,其结果是现在可以在高功率激光二极管的领域中通过使用宽带激光二极管来实现远高于一瓦特的光输出功率。

[0004] 为了实现可能最窄的激光发射,栅格与光场的强相互作用是必要的。然而,这种强相互作用栅格降低输出耦合的效率并且增加谐振器内的光损耗。因此,高的输出功率和高的电光转换效率通常与激光二极管的窄线宽相反。栅格相互作用的强度因此必须非常精确地适配激光场,以便在两个参数之间实现最佳效果。

[0005] 在具有分布式反馈的激光二极管的设计中,必须使栅格的影响保持尽可能低,因为即使电流路径的电阻的小的增加或者出现的光吸收常常会导致激光器性能的崩溃。此外,高阶($N \geq 10$)栅格的使用是有利的,因为这降低对于处理尤其对于光刻的要求。

[0006] 然而,在基于这种高阶栅格的具有分布式反馈的激光二极管的生产中,必要的栅格深度产生的容许制造公差极其小。此外,有利的是如果在高光功率密度的区域中,栅格的影响被降低以便减小谐振器中的损耗并且抵消出现的任何饱和效应,例如纵向烧孔。

[0007] 对于窄带激光二极管,出现作为另一标准的可在操作中实现的锁定范围。锁定范围指示栅格的布拉格波长与有源层的增益最大值在不增加光谱线宽(95%功率限制)的情况下可间隔开多远。该距离也被称作失谐($\Delta \lambda_{\text{det}}$)。锁定范围的调谐通常经由激光二极管的温度来完成。在对于室温下的光输出线与工作电流的比值具有均匀栅格的具有分布式反馈的现有技术(Crump等人,J.Phys.D:Appl.Phys.46(2013)013001;Decker等人,IEEEPhoton Technol.Lett 27(2015)1675)的激光二极管中,通常测量到0.9W/A的电光功率增量S。在那时,例如,已经在多达35K($\Delta \lambda_{\text{det}} \approx 10\text{nm}$)的热调谐窗口中成功地演示了1nm($\pm 2\sigma$ 范围)以下的线宽度。然而,在均匀栅格的情况下,参数范围通常已经被完全耗尽并且被大大地优化,使得可以仅以激光二极管的转换效率或输出耦合效率为代价实现热调谐行为的进一步改

进。

[0008] 本发明因此基于提供具有分布式反馈的激光二极管的目的,其中可以避免或至少显著地减少所描述的现有技术的问题中的一个或多个问题。特别地,将提供一种激光二极管及其生产方法,其中分布式反馈通过高阶的表面栅格而出现同时辐射优选地在一个面上被输出耦合,并且其中栅格的耦合强度与激光二极管中的导波的功率密度适配。

发明内容

[0009] 所陈述的目的通过根据权利要求1的激光二极管来实现。为此该激光二极管包括:有源层;波导区域,该波导区域至少部分地围绕该有源层;后端面;前端面,该前端面被设计用于使激光辐射输出耦合,其中,该有源层至少部分地沿着第一轴线在该后端面与该前端面之间延伸;以及栅格,该栅格可操作地连接到该波导区域,其中,该栅格包括多个脊和多个沟槽。本发明的特征在于,该多个沟槽被设计为使得沿着栅格的多个沟槽的耦合参数P的平均增量非零。这里,该沟槽的耦合参数P通过公式 $P = \frac{\Delta n}{w \cdot d_{res}}$ 来定义,其中, d_{res} 是该沟槽到该

有源层的距离, w 是该沟槽的宽度,并且 $\Delta n = |n - n_M|$ 是该沟槽的折射率 n 与围绕该沟槽的材料折射率 n_M 之间的折射率差(也被称为折射率对比度)。该沟槽与该有源层之间的距离是相应沟槽面向该有源层的面与该有源层面向此沟槽的面之间的最小距离。

[0010] 所引入的耦合参数用作栅格与在波导区域中平行于第一轴线引导的波的相互作用的强度的区别特征和排序特征。该耦合参数因此描述栅格的性质和与波的相互作用的强度之间的广义的一般关系,然而不表示波的特定物理性质。

[0011] 在本发明的另一个方面中,该激光二极管包括:有源层;波导区域,该波导区域至少部分地围绕该有源层;后端面;前端面,该前端面被设计用于使激光辐射输出耦合,其中,该有源层至少部分地沿着第一轴线在该后端面与该前端面之间延伸;以及栅格,该栅格可操作地连接到该波导区域,其中,该栅格包括多个脊和多个沟槽。本发明的特征在于,该多个沟槽被设计为使得该多个沟槽的耦合参数P的平均增量是非零,其中,该沟槽的耦合参数P通过公式 $P = w \cdot d \cdot n$ 来定义,其中, d 是沟槽的深度或者沟槽到有源层的距离, w 是沟槽的宽度并且 n 是沟槽的折射率。这是耦合参数P的替代定义。由不同定义产生的值可以互相转换。

[0012] 耦合参数P的定义不表示通常有效的测量规范。相反地,这旨在使得能够在公共栅格布置内实现各个沟槽的耦合强度的可比性。因此,所使用的平均定义或者深度、宽度和折射率度量的相应定义实际上在不同栅格之间可以不同;然而,在单个栅格结构内,必须做出清楚的定义。为了确定各个参数(栅格的沟槽的深度或距离、宽度和折射率或折射率对比度)和耦合参数的平均增量,优选地使用算术平均值。这在沟槽的壁例如通过逐步各向异性蚀刻工艺而具有不同的边缘轮廓的情况下是特别重要的。为了清楚地确定各个参数值,对应平均的必要性变得明显。

[0013] 栅格由于其尺寸而基本上是两种类型或两种模式。通过波导结构的各部分从半导体表面蚀刻的栅格通常具有对于周围波导区域相对较大的折射率差 Δn 并且被称为表面栅格。在这种栅格中,物理栅格强度(即栅格与在波导区域中引导的波之间的相互作用的实际强度)通常由栅格结构的总反射率 R 来确定(Decker等人,IEEE Photon.,Technology

Lett., 27 (2015) 1675)。通过使用总反射率R,认为在表面栅格中被蚀刻区域中的垂直模式变形太大以致在纵向方向上的耦合未从模式轮廓解耦。因此需要通过精细的数值方法(例如,模式匹配)来计算反射率R。相比之下,存在由第二外延步骤嵌入在波导中的栅格。相对于周围材料或者与波导区域,这些嵌入式栅格通常仅具有相对较弱的折射率对比度。在这种情况下垂直模式在栅格区域中几乎不变化。在这种掩埋式栅格中,物理栅格强度通常不由栅格结构的总反射率R来确定,而是替代地由等效耦合因子长度积kL来确定(Crump等人, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 013001)。这个积描述在正向和反向上传播导波之间的局部耦合。为了生产过度生长的栅格,必须中断外延生长,栅格必须被限定(例如,通过电子束)并且然后过度生长。通常这种栅格结构被称为掩埋式栅格。

[0014] 本发明基于如下认识:在高光功率密度的区域中,为了减小谐振器中出现的损耗并且避免饱和效应,例如纵向烧孔,必须减小栅格相互作用的强度。根据理论研究(Crump等人, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 013001)知道了特别是在沿着光轴的纵向方向上具有分布式反馈的常规宽带高功率激光二极管中,建立了光功率的非均匀分布。在激光辐射的单侧输出耦合的情况下,尤其是在激光二极管内的功率密度在输出耦合端面的方向上连续地增加的情况下。确切的函数关系取决于激光二极管的特定设计,但是至少可以通过简单的数学函数(线性的、指数的、双曲线的等)来至少近似该函数关系。另外,为了降低在生产期间栅格对技术上不可避免的变化(例如,在沟槽的产生期间的蚀刻深度方面)的灵敏性,栅格的耦合强度的变化是有利的。结果,通过对耦合强度下降的适合选择,可以确保栅格至少在一些区域中具有足够高的反射率或耦合强度。

[0015] 栅格的耦合强度对具有分布式反馈的激光二极管内的光功率密度的适配产生根据本发明的具有栅格的激光二极管,其中栅格的耦合参数基本上与激光二极管内的光功率密度成反比。特别地,栅格的耦合强度对光功率密度的适配因此导致一种具有分布式反馈的激光二极管,其中耦合参数沿着谐振器轴线从后端面向前端面连续地减小。这可以例如通过根据潜在的比例性比值来沿着该轴线减小相邻沟槽的深度或者沿着该轴线减小沟槽的宽度或者沿着该轴线减小沟槽的折射率来完成。所使用的栅格优选地是表面栅格,其中,栅格的阶在10与100之间的范围中。通过使用这种高阶栅格,基于由激光二极管发射的激光波长的各个栅格元件之间(即沟槽之间)的距离显著地变宽,并且因此减少对加工的准确度的需求。

[0016] 虽然沟槽的耦合参数R表示栅格元件与在波导区域中引导的波的相互作用的强度的局部度量,但是整个栅格的效应可以借助于另一个确定变量(所谓的变迹度量A)来描述。根据权利要求1中陈述的该多个沟槽的耦合参数R的平均增量是非零的条件,遵循对于根据本发明的在激光二极管的后端面与前端面之间沿着第一(纵向)轴线的栅格的多个沟槽的耦合参数P来说存在最大值和最小值。因此通过

$$[0017] \quad A_p = \frac{\text{Maximum}\{P\}}{\text{Minimum}\{P\}}$$

[0018] 给定比值,除了描述耦合参数P的平均增量之外,还适合于描述整个栅格的效应。

[0019] 用于确定变迹度量A_p的给定公式基于各个沟槽的纯几何和光学性质,而不考虑导波与栅格的特定相互作用。虽然基本物理关系用正确的符号来记录,然而不可以据此直接推导出一般比例性关系。为了能够考虑相互作用的比例性,可替代地使用物理栅格强度。

[0020] 特别地可以使用以下确定变量：(1) 栅格的局部反射率 $R(x)$ 和(2) 栅格的耦合因子长度积 $kL(x)$ ，在每种情况下均作为纵向位置 x 的函数。因为不能合理地计算栅格中的各个栅格脊的反射率 R 和耦合因子长度积 kL ，所以替代地计算在整个腔长度上方延伸的对应的虚均匀栅格的具有反射的点 x 处的反射率 R 或耦合因子长度积 kL 。因为栅格的反射率 R 或耦合因子长度积 kL 是波长相关的，所以总是使用相应的最大值。取决于本栅格模式，然后可以根据各自具有最小耦合强度和最大耦合强度并且关于彼此设定的相同类型的两个均匀栅格来确定栅格结构的总反射率 R_{\max} 或者耦合因子长度积 kL 。

[0021] 在根据本发明的耦合参数 P 的变化中，在点 x 处沿着第一轴线的局部变化因此遵循如下变迹度量的替代公式：

$$[0022] \quad A_{\kappa} = \frac{\text{Maximum}\{R(x)\}}{\text{Minimum}\{R(x)\}} \text{ 或 } A_{\kappa L} = \frac{\text{Maximum}\{\kappa L(x)\}}{\text{Minimum}\{\kappa L(x)\}}。$$

[0023] 通过局部反射率 $R(x)$ 或耦合因子长度积 $kL(x)$ ，也可以得出有关栅格的各个确定变量(特别是深度 d (或者沟槽到有源层的距离 d_{res})、栅格的各个沟槽的宽度 W 和折射率 n 或其相应的折射率对比度)的比例影响的直接结论。

[0024] 特别地，如果局部反射率 $R(x)$ 或耦合因子长度积 $kL(x)$ 根据本发明沿着激光二极管的谐振器轴线变化，则结果是大于或等于1.1的优选变迹度量 A 。另外优选的是大于或等于1.2、大于或等于1.3、大于或等于2或者大于或等于3的变迹度量 A 。这里，对于栅格强度的变化优选地是任意函数关系，沿着纵向轴线的单调增加、线性增加或二次增加是特别优选的。增加既可以从前端面指向后端面也可以从后端面指向前端面。特别优选的是栅格的耦合适配于平行于纵向轴线在波导区域中引导的波的光功率密度、从而沿着该轴线与波产生恒定相互作用的函数关系。

[0025] 在本发明的优选的实施例中，因此提出了栅格具有大于或等于1.1的至少一个变迹度量 A 。

[0026] 除变迹度量的这种全局定义之外，也可以经由沿着栅格结构的沟槽的或栅格的各个参数的对应变化 V 来进行根据本发明的激光二极管性质的定义。这些是栅格的多个沟槽的耦合参数 P 的平均增量可以为非零的根据本发明的激光二极管的特定的特别优选的实施例。在这种情况下，可以特别地经由沿着栅格结构的对应参数的相应的最大值和最小值的比值来定义对应变化 V 。

[0027] 结果，特别优选的实施例由大于或等于1.1的各个沟槽到有源层的距离的变化 V_{dres} 产生，即

$$[0028] \quad V_{\text{dres}} = \frac{\text{Maximum}\{d_{\text{res}}\}}{\text{Minimum}\{d_{\text{res}}\}}。$$

[0029] 进一步优选的是大于或等于1.2以及大于或等于1.3的变化 V_{dres} 。

[0030] 借助于确定相应参数比值的对应等式，

$$[0031] \quad V_w = \frac{\text{Maximum}\{w\}}{\text{Minimum}\{w\}}$$

[0032] 经由各个沟槽的宽度 W 的变化 V_w ，可以确定针对大于或等于1.1、大于或等于1.2以

及大于或等于1.3的值的优选实施例。

[0033] 对于其他特别优选的实施例的定义,将使用沟槽的相应折射率与围住沟槽的材料的折射率之间的折射率差 Δn 的变化 $V_{\Delta n}$ 。然后借助于

$$[0034] \quad V_{\Delta n} = \frac{\text{Maximum}\{\Delta n\}}{\text{Minimum}\{\Delta n\}}$$

[0035] 产生针对大于或等于1.1、大于或等于1.2以及大于或等于1.3的值的 $V_{\Delta n}$ 的优选实施例。

[0036] 作为另一个变化参数,沿着栅格的各个沟槽的距离随着栅格常数 Λ 可以是可变的,由此对于单个沟槽的相应的有效折射率 n_{eff} 来说满足针对每个整数 N 的布拉格条件 ($\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda / N$)。经由栅格的栅格常数 Λ 的变化 V_{Λ} ,即在相邻沟槽的距离内,借助于相应参数比值的对应确定的等式,

$$[0037] \quad V_{\Lambda} = \frac{\text{Maximum}\{\Lambda\}}{\text{Minimum}\{\Lambda\}}$$

[0038] 可以确定针对大于或等于1.1、大于或等于1.2以及大于或等于1.3的值的优选实施例。

[0039] 在根据本发明的激光二极管中,可以沿着谐振器轴线设定栅格强度之间的任意函数关系,该栅格强度之间的任意函数关系可以全局地通过前述变迹度量中的一个变迹度量或对应变化参数来描述。栅格强度沿着谐振器的单调函数关系是特别优选的。进一步优选的是栅格强度沿着谐振器的线性函数关系。另外优选的是栅格强度沿着谐振器的二次函数关系。特别优选的是适配于在激光二极管中引导的波的功率密度的栅格强度沿着谐振器的函数关系,其中与低功率密度的区域中的栅格强度相比,在高功率密度的区域中,栅格强度减小。

[0040] 在根据本发明的激光二极管中,栅格强度沿着谐振器的函数关系的取向是可自由调整的。然而,从前端面向后端面增加的栅格强度是特别优选的。

[0041] 所产生的栅格可以是无源栅格、有源栅格或半有源栅格。因此有源地以及无源地指示在栅格的区域中存在光学放大。如果仅在栅格的各个子区域中发生光学放大,则该栅格是半有源栅格。

[0042] 在根据本发明的激光二极管的技术实施方式中,大于或等于 $100\mu\text{m}$ 的栅格长度是特别优选的。进一步优选的是对应于大于或等于谐振器长度的10%的栅格长度,其中,谐振器的长度通过前端面与后端面之间的距离来给定。另外优选的是大于或等于谐振器的长度的20%的栅格长度。栅格也可以在谐振器的整个长度上延伸。对于较短的栅格长度,栅格沿着第一轴线(即沿着纵向轴线或谐振器轴线)的位置原则上是任意可调整的。然而,直接定位在前端面 and/或后端面上是特别优选的。同样地,可以将栅格划分成若干子区域。子区域不必是连续的并且可以沿着谐振器轴线任意地分布。特别地,各个栅格子区域也可被设计为无源的、有源的或半有源的。

[0043] 在本发明的另一个优选实施例中,提出了根据本发明的使栅格的耦合强度适配于在波导区域中引导的波的功率密度的构思也可以被发送到垂直于有源层的轴线上。特别地,沟槽的宽度在有源层方向上的逐渐变细是有利的。沟槽的宽度在有源层方向上的特别

的按V形逐渐变细是特别有利的。

[0044] 在本发明的另一个优选实施例中。提出了根据本发明的使栅格的耦合强度适配于在波导区域中引导的波的功率密度的构思也以可沿着垂直于第一轴线延伸的第二轴线而被发送。出于此目的,沟槽内的耦合参数被认为是位置沿着该轴线的直接函数,并且沟槽的该位置相关的耦合参数适配于在波导区域中引导的波的功率密度,其中与沟槽的位置相关的耦合参数的值在低功率密度的区域中相比,在高功率密度的区域中,沟槽的位置相关的耦合参数的值减小。

[0045] 本发明的另一方面涉及一种生产具有上述特征的激光二极管的方法。该方法中使用的方法基本上取决于本发明的特定实施例并且可以根据需要进行选择。例如,可以通过用于形成栅格的适合材料的针对性结构改变来产生栅格的腹板。在这种情况下,特别地,借助于FIB或材料改变而植入杂质是可能的,例如通过局部结晶或非晶化工艺的针对性起始反应。借助于这种类型的处理,通常可能同时影响确定耦合参数(深度、宽度和折射率或者相对于脊的周围环境的折射率对比度)的各个参数以及沿着谐振器得到的栅格强度(经由 $R_{\max}(x)$ 或 $k_L(x)$ 确定的)。另一种处理方式是通过直接暴露沟槽。这可以特别地通过应用适合的蚀刻工艺来实现。在这种情况下产生的沟槽然后使折射率降低至其周围环境,例如空气。然而,除了耦合强度的纯几何修改之外,也可以通过随后用另一材料或电介质填充沟槽(例如通过选择性地使沟槽壁过度生长)来将折射率变化用于进一步影响耦合参数过程。

[0046] 用于生产具有以上提及的特征的激光二极管的该方法特别优选地包括:对该波导区域应用具有多个开口的蚀刻掩模,其中,该开口的宽度沿着第一轴线和/或第二轴线局部地变化;以及通过适合的蚀刻工艺来图案化经掩模处理的波导区域。该蚀刻过程可以优选地是各向异性反应离子蚀刻。

[0047] 使用这种蚀刻工艺的优点在于利用所谓的微负载效应的可能性。该效应描述了所观察到的蚀刻速率对待蚀刻结构的特性大小的依赖性。特别地,在产生亚微米沟槽时,给定蚀刻时间期间的蚀刻速率以及因此可实现的蚀刻深度取决于光泽面开口的宽度和沟槽的当前蚀刻深度。在了解对应关系的情况下,因此可以通过指定光泽面开口的宽度来实现蚀刻深度的受控变化。通过对该效应的针对性利用,根据本发明的栅格的耦合强度对在波导区域中引导的波的适配可以在单个蚀刻工艺内进行。

[0048] 本发明的进一步优选的实施例将根据从属权利要求中所提及的其余特征而变得显而易见。

[0049] 除非另外在个别情况下陈述,否则本申请中所提及的本发明的各种实施例可以有利地彼此组合。

附图说明

[0050] 下面将参考附图在实施例中对本发明进行说明。特别地:

[0051] 图1是根据现有技术的具有分布式反馈的激光二极管的空间示意表示;

[0052] 图2是针对根据现有技术的具有分布式反馈的激光二极管中的纵向功率分布的理论计算;

[0053] 图3a、图3b是根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的优选实施例的示意表示;

[0054] 图4是根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的栅格结构的优选实施例的三个示意表示；

[0055] 图5是根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的栅格结构的特别优选的实施例的示意表示；

[0056] 图6是用于生产根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的优选实施例在蚀刻之后的平面图中和横截面中的蚀刻掩模的示意表示；

[0057] 图7是使用根据图6的掩模来生产根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的优选实施例中的经实验实现的沟槽深度；

[0058] 图8是平面图中和横截面中的根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管的另一优选实施例的示意表示；

[0059] 图9是具有通过均匀栅格的分布式反馈的常规激光二极管的示例性功率曲线；

[0060] 图10是与通具有过均匀栅格的分布式反馈的常规激光二极管(相当于 $A_{P1}=1.0$)相比具有分布式反馈的激光二极管($A_{P1}=3.0$)的优选实施例的性能；

[0061] 图11是用于在均匀栅格的情况下根据沟槽到有源层的距离 d 和沟槽在有源层附近的最小宽度 w 来确定栅格结构的最大可实现反射率 $R_{\max}(d_{\text{res}}, w)$ 的数值模拟；

[0062] 图12是根据本发明的用于按栅格强度的变化针对激光二极管的多个实施例来确定栅格的局部解析的最大反射率 $R_{\max}(x)$ 的数值模拟。

具体实施方式

[0063] 图1示出了根据现有技术的具有分布式反馈的激光二极管100的空间示意表示。有源层10在顶部和底部被直接相邻的波导区域12围住。激光辐射的产生和传播优选地沿着第一轴线X(同时沿着光轴)进行。出于此目的,第二轴线Y平行于有源层10延伸。激光二极管100的被第一轴线X穿过的边缘形成后端面14和前端面16。在这种情况下,在激光二极管100中产生的激光辐射经由前端面16离开。该前端面16可以设置有另外施加的抗反射涂层。然而,后端面14常常设置有镜面涂层以抑制输出耦合。在激光二极管的操作期间,在前端面16与后端面14之间建立波26,该波26沿着第一轴线X被引导通过波导区域12。在激光二极管100内,位置相关的功率密度分布是由于内部结构而导致的。底层分布函数基本上取决于激光二极管100的相应的阻尼和反馈性质。在该表示中,在前端面16的方向上的内部功率密度的增加通过导波26的增加的振幅来指示。在具有分布式反馈的激光二极管100的情况下,在波导区域12中引导的波26至少在截面中与栅格18相互作用,其中栅格18包括多个脊22和沟槽24。借助于导波26与栅格18的相互作用,发生对所产生的激光辐射的频率选择,使得可以发生对单个或几个放大模式的发射的限制。在根据现有技术的栅格18的情况下,除制造公差之外各个沟槽24的深度和宽度是基本上恒定的。因此,根据现有技术的栅格18通常对栅格特性没有或者有很少的局部依赖性。然而,由于以上提及的功率密度分布的空间依赖性,在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用也是高度位置相关的,这对激光二极管100的发射特性具有负面效应。

[0064] 图2示出了针对根据现有技术(Crump等人,J.Phys.D:Appl.Phys.46(2013)013001)的具有分布式反馈的激光二极管中的纵向功率分布的理论计算。该图分别示出了具有分布式反馈的激光二极管100在针对在波导区域12中引导的波26与根据现有技术的对

应栅格18之间的不同耦合因子长度积 κL (与耦合参数成比例) 的阈值电流下, 在沿着第一轴线X的纵向方向上的平均功率分布28。曲线图的左侧与激光二极管100的后端面14上的位置相对应, 并且曲线图的右侧与激光二极管100的前端面16上的位置相对应。在该示例中后端面14与前端面16之间的距离是3mm。在曲线图中用虚线另外绘制的曲线过程(course) 与考虑到后端面14处的反射中的可变相位状态的影响的功率分布相对应。可以看到, 针对多种情况的具有分布式反馈的激光二极管100在沿着第一轴线X的纵向方向上的平均功率分布28没有恒定值, 而是在前端面16的方向上的发生增加。

[0065] 图3a示出了根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例的示意表示。所示出的表示和各个参考标记的分配大部分与图1相对应。然而, 基本区别在于栅格18的结构设计方面。与图1中的栅格18对比, 该结构设计已经被修改为使得栅格的耦合对在波导区域12中引导的波26的功率密度的适配成为可能。出于此目的, 在所示出的实施例中, 沿着第一轴线X的栅格18的各个沟槽24深度 d 从后端面14附近的最大沟槽深度 d_{\max} 开始到前端面16附近的最小沟槽深度 d_{\min} 连续减小。通过改变沟槽深度 d , 实现了在高功率密度的区域中, 在波导区域12中引导的波26与栅格18之间发生减少的相互作用, 然而在低功率密度的区域中, 在波导区域12中引导的波26与栅格18之间发生增大的相互作用。结果, 特别地可以避免或者至少减小放大方面的饱和效应。在图3a中, 为了进一步澄清栅格18的几何性质, 特别强调了子区域。示出了两个相邻沟槽24, 这两个相邻沟槽通过脊22彼此分离。沟槽的平均距离与限定栅格18的中心波长的栅格常数 Λ 相对应。进而各个沟槽24可以各自通过平均宽度 w 、平均深度 d 和折射率 n 来描述, 并且 $R_{\max}(x)$ 和 $\kappa L(x)$ 由这些参数产生。特别地, 这三个参数中的每一个参数均可以彼此独立地变化, 其中这种变化影响在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用。在所示出的实施例中, 对于 N 元件栅格18的所有元件来说, 在每种情况下, 沟槽24的宽度 w 和折射率 n 都可以被假定为是恒定的, 使得 $w_1 = w_2 = w_N$ 且 $n_1 = n_2 = n_N$ 。另一方面, 栅格18的沟槽24的深度朝向前端面16逐渐减小并且因此通过不等式 $d_1 > d_2 > d_N$ 来描述。

[0066] 图3b示出了根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例的相同示意表示。然而, 与图3a中所示的表示对比, 这里示出了作为沟槽24到有源层10的距离的参数 d_{res} 的定义。在该情况下, d_{res} 经由栅格18的上边缘到有源层10的距离而被链接到 d 。所有其他参考标记和参数与图3a中所示的事实一致, 本描述相应地适用。同样对于该实施例, 可以假定 $w_1 = w_2 = w_N$ 且 $n_1 = n_2 = n_N$ 。另一方面, 栅格18的沟槽24到有源层10之间的距离朝向前端面16逐渐增大并且因此在这里通过不等式 $d_{\text{res}1} < d_{\text{res}2} < d_{\text{res}N}$ 来描述。

[0067] 图4示出了根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的栅格结构18的优选实施例的三个示意表示。图4a中所示的表示与图3中所描述的栅格18的结构相对应, 在沟槽24的恒定沟槽宽度 w 和恒定折射率 n 的情况下具有变化的沟槽深度 d 。各个参考标记的分配相应地适用。相比之下, 在根据图4b的表示中, 沟槽24的沟槽深度 d 和折射率 n 保持不变, 而后端面14与前端面16之间的各个沟槽的宽度 w 有变化。特别地, 示出了在前端面方向上沟槽24的宽度的减小。在图4c中所示的表示中, 示出了各个沟槽24的深度 d 和这些沟槽24的宽度 w 均保持恒定的栅格18。在该实施例中, 仅栅格18的各个沟槽24的折射率 n 发生改变。此改变可以例如通过选择性地填充或者部分地涂覆被蚀刻到适用于形成栅格18的材料中的沟槽24或者通过分别在所述材料中注入杂质来实现。所有这些实施例的共同之处在于, 因此

在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用的强度可以沿着光轴改变。然而,所提及的示例性实施例仅表示所有可能性中可用于影响的部分区域。特别地,可以通过所列举的实施例的巧妙组合来以特别针对性的方式影响相互作用。这尤其允许在生产根据本发明的激光二极管100时可以考虑某些工艺的具体特性,并且也使得能够最可能使制造公差干扰影响最小化。

[0068] 图5示出了根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的栅格结构18的特别优选的实施例的示意表示。对于该表示,选择了栅格18的脊22和沟槽24的布置,该布置与图4a中的图相对应,即其中栅格18的沟槽24的深度d从后端面14开始到前端面16逐渐减小。然而,与前述实施例和示例对比,各个沟槽24在这里具有不同于在先前图中作为示例一直使用的矩形形状的壁结构。特别优选的是图5a中所示的栅格结构,其中沟槽24的宽度w在有源层10的方向上以连续V形方式逐渐变细。这样的布置使得有可能也在垂直于有源层10的方向上影响在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用,并且因此也使栅格18的耦合与在激光二极管100中沿着该方向出现的功率密度分布适配。在这点上,该实施例表示沟槽24的深度d的变化,其中各个沟槽24内的宽度w具有叠加变化。图5b中所示的图也示出了各个沟槽24的深度d的变化,其中各个沟槽24内的宽度w具有叠加变化。该示例例如可以是蚀刻壁不具有均匀光滑结构的各向异性的蚀刻工艺的结果。

[0069] 图6示出了用于生产根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例的蚀刻掩模30在蚀刻之后的平面图和截面中的示意表示。图6a中的平面图中所示的蚀刻掩模30例如可以借助于接触光刻来生产。蚀刻掩模30具有带有多个开口32的不同区域,由此确定所产生的栅格18的特性。图示的蚀刻掩模30被适配为沿着在后端面14与前端面16之间延伸的第一方向X形成栅格18,其中根据图3的优选实施例的各个沟槽24的深度d沿着第一方向X逐渐减小。特别地,这个被实现的原因在于,根据本发明,蚀刻掩模30的各个开口32的宽度沿着第一方向X也减小。在反应离子蚀刻的情况下,由此可以利用微负载效应,该微负载效应经由蚀刻掩模30的开口32的宽度的变化实现在蚀刻工艺期间获得的沟槽24的深度d的变化。也可以通过诸如电子束的备选方法来产生光泽面开口的变化。借助于掩模30的对应设计,因此可以发生对所产生的沟槽24的宽度w和深度d以及得到的结果 $R_{\max}(x)$ 和 $kL(x)$ 的针对性影响。可以通过根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的前述优选实施例的各个特征的组合使用来进一步增强或优化该效应。图6b示出了用于生产根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例的蚀刻掩模30的截面。可见的是所生产的栅格18的脊22和沟槽24以及用于在蚀刻工艺期间用蚀刻掩模30的开口32覆盖的蚀刻掩模30。

[0070] 图7示出了在使用图6中所示的蚀刻掩模30来生产具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例之后的经实验确定的沟槽深度。所例示的示图的横坐标表示沟槽24沿着纵向第一方向X的绝对位置,其中各个沟槽24之间的距离在每种情况下都是 $10\mu\text{m}$ 。示图的纵坐标对应于相应沟槽24的实测沟槽深度d相对应。由于蚀刻掩模30的开口32的宽度不同,各向异性反应离子蚀刻导致微负载效应,根据本发明的该微负载效应导致实测沟槽深度d的期望变化。经实验确定的沟槽24的深度d被显示为各个圆。实线与所实现的深度调制的平均进展相对应。在这种情况下,较大的沟槽深度d与蚀刻掩模30中的较宽开口32相对应。另一方面,较小的沟槽深度d可以与蚀刻掩模30中的较窄开口32相关联。可以提前相对于另外的

栅格参数非常精确地计算出根据本发明的用于生产具有分布式反馈的激光二极管100的微负载效应,使得经由根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100中的蚀刻掩模30,可以对在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用的强度进行准确的调整。

[0071] 图8示出了平面图中和截面图中的根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的另一优选实施例的示意表示。图8a示出了根据本发明的具有分布式反馈的激光二极管100的栅格18的平面图。该平面图沿着第一方向X和第二方向Y延伸,其中后端面14和前端面16在每种情况下被切割。在这两个端面之间的一部分,栅格18沿着第一方向X延伸。根据前述实施例,该栅格具有多个脊22和多个沟槽24,其中这些沟槽24的宽度 w 在第一方向X上以及在第二方向Y上均可以不同。以这种方式,在波导区域12中引导的波26与栅格18之间的相互作用也可能沿着第二方向Y变化,使得在该方向上可以实现根据本发明的栅格18的耦合强度与具有分布式反馈的激光二极管100内的局部功率密度分布的适配。可以在图8b中看到在反应离子蚀刻期间由微负载效应引起的沿着图8a中绘制的线A-B的各个沟槽的深度 d 变化。类似于先前的描述,沟槽24的深度 d 在小沟槽宽度 w 的区域中减小,然而在高沟槽宽度 w 的区域中,也实现了较高的沟槽深度 d 。这导致相应较高的 $R_{\max}(x)$ 和 $k_L(x)$ 。借助于与图5a中所示的V形蚀刻轮廓的对应组合,因此可以在所有三个空间方向上实现栅格18的耦合强度与在波导区域12中引导的波26的适配。

[0072] 在一系列测量中成功地演示了根据本发明的构思的实现。特别地,根据本发明的具有分布式反馈的宽带激光二极管被产生为具有通过使耦合参数与激光二极管内的功率密度相匹配而沿着光轴变化的耦合强度。除具有根据现有技术的恒定沟槽深度的栅格结构的激光二极管之外,还加工了具有朝向前端面减小的栅格深度的激光二极管。然后激光二极管被涂覆在具有反射率 $R_R=95\%$ 的后端面上和具有反射率 $R_F<0.05\%$ 的前端面上。对于该激光二极管,能在多达2A的电流下在连续波模式下记录功率特性。此外,在 -20°C 至 50°C 的温度下以 5°C 为增量测量光谱发射,以确定热锁定范围 ΔT 。这指示在该温度范围之上发射保持纵向单模,而没有其他布拉格或法布里-珀罗模式开始产生激光。

[0073] 图9示出了具有通过均匀栅格的分布式反馈的常规激光二极管的示例性性能曲线(Crump等人,J.Phys.D:Appl.Phys.46(2013)013001)。该激光二极管优选地在973nm附近的波长范围中发射辐射并且可以通过基本上在970nm与976nm之间的6nm范围内热调谐到低于 $1\text{nm}(\pm 2\sigma)$ 的典型线宽处的窄带发射来激发。激光二极管的锁定范围 ΔT 是35K。波长以大约 $0.08\text{nm}/\text{K}$ 热移位。这里,在大约 20°C 的工作温度 T 下测得的电光功率增量是 $S=0.9\text{W}/\text{A}$ 。

[0074] 图10示出了与具有通过均匀栅格的分布式反馈的常规激光二极管相比的具有分布式反馈的激光二极管100的优选实施例的性能。这里,分别地,在激光二极管的温度范围 ΔT 中对照温度 T 来标绘最大实测电光功率增量 S 。在这里所示的常规栅格的情况下,与图9中所示的功率曲线对比,能够通过改变栅格参数将激光二极管的锁定范围 ΔT 扩展到45K。然而,如可以从对应曲线看到的,电光功率增量 S 在该范围中其值清楚地下降至低于 $0.6\text{W}/\text{A}$,使得一般而言也必须预料到高功率激光二极管在此该光谱范围中具有下降输出线。在根据本发明的具有栅格强度 $R_{\max}(x)$ 和 $k_L(x)$ 的线性变化的激光二极管中,测量到40K的锁定范围 ΔT 。电光功率增量 S 在该范围中也保持在大于 $0.8\text{W}/\text{A}$ 的值处。随着栅格强度的二次变化,能够在电光功率增量 S 大约为 $0.9\text{W}/\text{A}$ 的电光功率增量情况下测得45K的锁定范围 ΔT 。

[0075] 图11示出了用于在均匀栅格的情况下根据沟槽到有源层的距离 d_{res} 和有源层附近

的沟槽的最小宽度 w 来确定栅格结构的最大可实现反射率 $R_{\max}(d_{\text{res}}, w)$ 的数值模拟。最大可实现反射率 R_{\max} 被示出为等值线图。由此,可以取各个反射值的等值线的特定过程。两条垂直虚线分别与50nm和100nm的沟槽的典型最小宽度 w 的值相对应。这里未明确地考虑沟槽的折射率 n 的影响,因此对于所有沟槽来说,沟槽的折射率 n 被假定为是恒定的。计算是基于具有总长度 $L=6\text{mm}$ 的阶 $N=40$ 的表面栅格。作为沟槽到有源层的距离 d_{res} 的函数的最大可实现反射率 R_{\max} 在沟槽的对应固定宽度 w 处的分布曲线可以通过各个等值线取自垂直段。该过程被示出在图11的下部中。在示例中500nm与700nm之间的范围中的结果示出了沟槽到有源层的距离 d_{res} 与最大可实现反射率 R_{\max} 之间的准线性相关性。这两个极限值在根据本发明的这种激光二极管的生产中限定优选的工作范围,因为由于简单的函数关系,所以生产中的公差是不太重要的,并且因此在此区域中可以完成栅格生产中的期望反射率的特别简单且可靠的设定。

[0076] 图12示出了用于针对根据本发明的具有有效栅格强度的变化的激光二极管的多个实施例来确定栅格的局部解析的最大反射率 R_{\max} 的数值模拟。所生产的栅格的长度 L 在每种情况下均是6mm。特别地示出了针对反射率对栅格位置 x 具有线性、抛物线和指数相关性的三种不同的栅格类型的作为栅格位置 x 的函数的沟槽到有源层的距离 d 的局部解析的过程。此外,对于在栅格的整个长度 L 上具有固定反射率的常规均匀栅格的局部解析的最大反射率 $R_{\max}(x)$ 的过程被示出作为参考。沟槽到有源层的距离 d 的变化优选地在从图11针对该参数所确定的500nm与700nm之间的线性工作范围中进行。可以在图11中同样示出的过程曲线的帮助下根据参数变化确定作为栅格位置 x 的函数的局部解析的反射率 $R_{\max}(x)$ 的相关性。特别地可以看到,对于在线性工作范围中具有50nm的固定最小宽度 w 的沟槽,局部解析的最大反射率 $R_{\max}(x)$ 在激光二极管的后端面与前端面之间在大约0.2与0.7之间变化,然而对于在大致相同的条件下具有100nm的固定最小宽度 w 的沟槽,局部解析的最大反射率 $R_{\max}(x)$ 在后端面与前端面之间仅在0.1与0.5的值之间变化。如果在根据本发明的激光二极管的设计中将改变可能的栅格参数中的仅一个栅格参数,则所有其他参数也应该被检查其影响并相应地考虑。根据各个反射率 $R_{\max}(x)$ 的过程,可以确定栅格的变迹度量 A 。对于所检查的栅格,图12示出了3.5和5附近的值,这些值全部大于1.1。耦合因子长度积 $\kappa L(x)$ 的值是与所示出的曲线过程对应的方式通过转换来获得的。

[0077] 这些结果表明,通过根据本发明的栅格的耦合强度对激光二极管内的光功率密度的变化和适配,可以实现性能参数的显著改进。在本情况下,与通过具有均匀栅格的分布式反馈的传统激光二极管对比,通过对栅格进行变迹,能够在不使电光功率增量 S 显著降级的情况下,证明在5K与10K之间的激光二极管的热稳定性和热调谐性能的增加。

[0078] 特别地,可以证明能够在各个沟槽到有源层的距离下设定根据本发明的变化 $V_{d_{\text{res}}}$ 的激光二极管。这里,距离 d_{res} 的全局最大值是 $0.50\mu\text{m}$ 并且距离 d_{res} 的全局最小值是 $0.70\mu\text{m}$ 。因此,在各个沟槽到有源层的距离 d_{res} 处, $V_{d_{\text{res}}}$ 的优选变化是1.4。由此,这两个极端值位于激光二极管的外端面中的一个端面上。

[0079] 最后应当指出的是,针对根据本发明的激光二极管所示出的结果是对各个原型的初步首次测试测量结果。特别地,尚未进行综合性的工艺和参数优化,使得可能的锁定区域肯定存在相当大的进一步扩展的可能性。

[0080] 参考列表

[0081]	10	有源层
[0082]	12	波导区域
[0083]	14	后端面
[0084]	16	前端面
[0085]	18	栅格
[0086]	22	脊
[0087]	24	沟槽
[0088]	26	导波
[0089]	28	功率密度
[0090]	30	蚀刻掩模
[0091]	32	掩模开口
[0092]	100	激光二极管
[0093]	d	沟槽深度
[0094]	d_{res}	沟槽与有源层之间的距离
[0095]	W	沟槽宽度
[0096]	n	折射率
[0097]	Δn	折射率差(也是折射率常数)
[0098]	Λ	栅格常数
[0099]	I	强度
[0100]	$\Delta \lambda$	光谱线宽
[0101]	$\Delta \lambda_{det}$	失谐
[0102]	S	电光功率增量
[0103]	R	反射率
[0104]	kL	耦合因子长度积
[0105]	X	第一轴线或方向
[0106]	Y	第二轴线或方向
[0107]	P	耦合参数
[0108]	A	变迹度量(Apodisierungsmaßzahl)
[0109]	V	变化

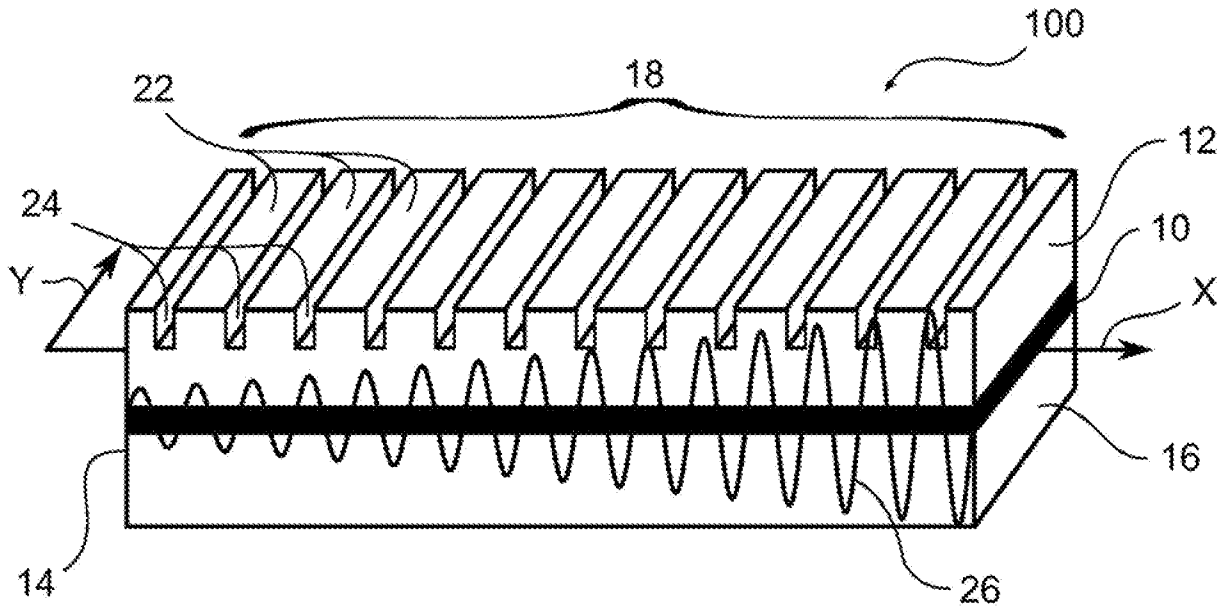


图1

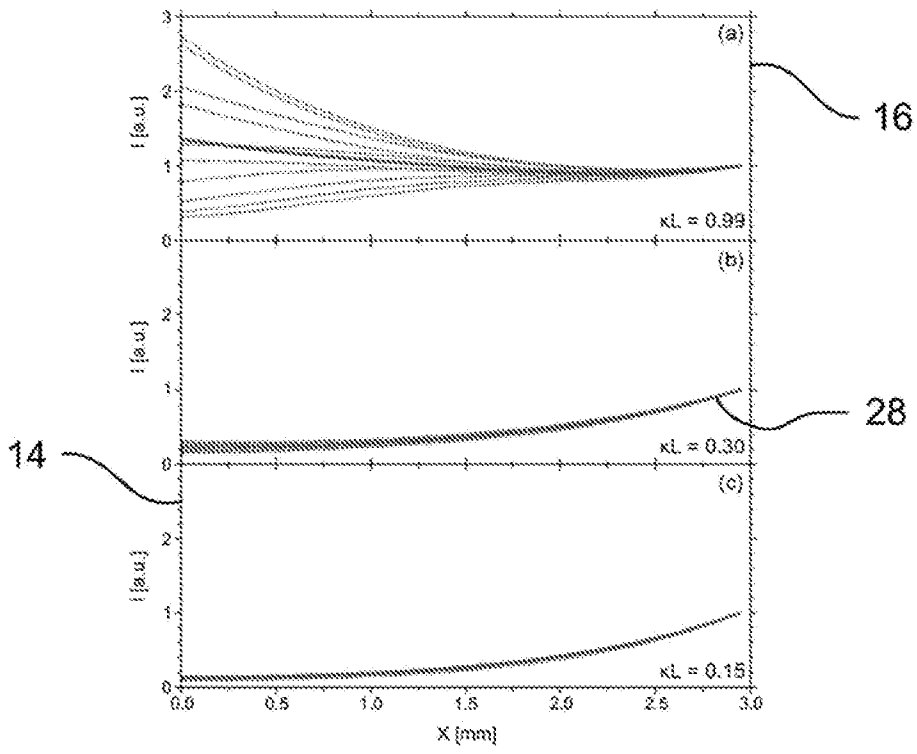


图2

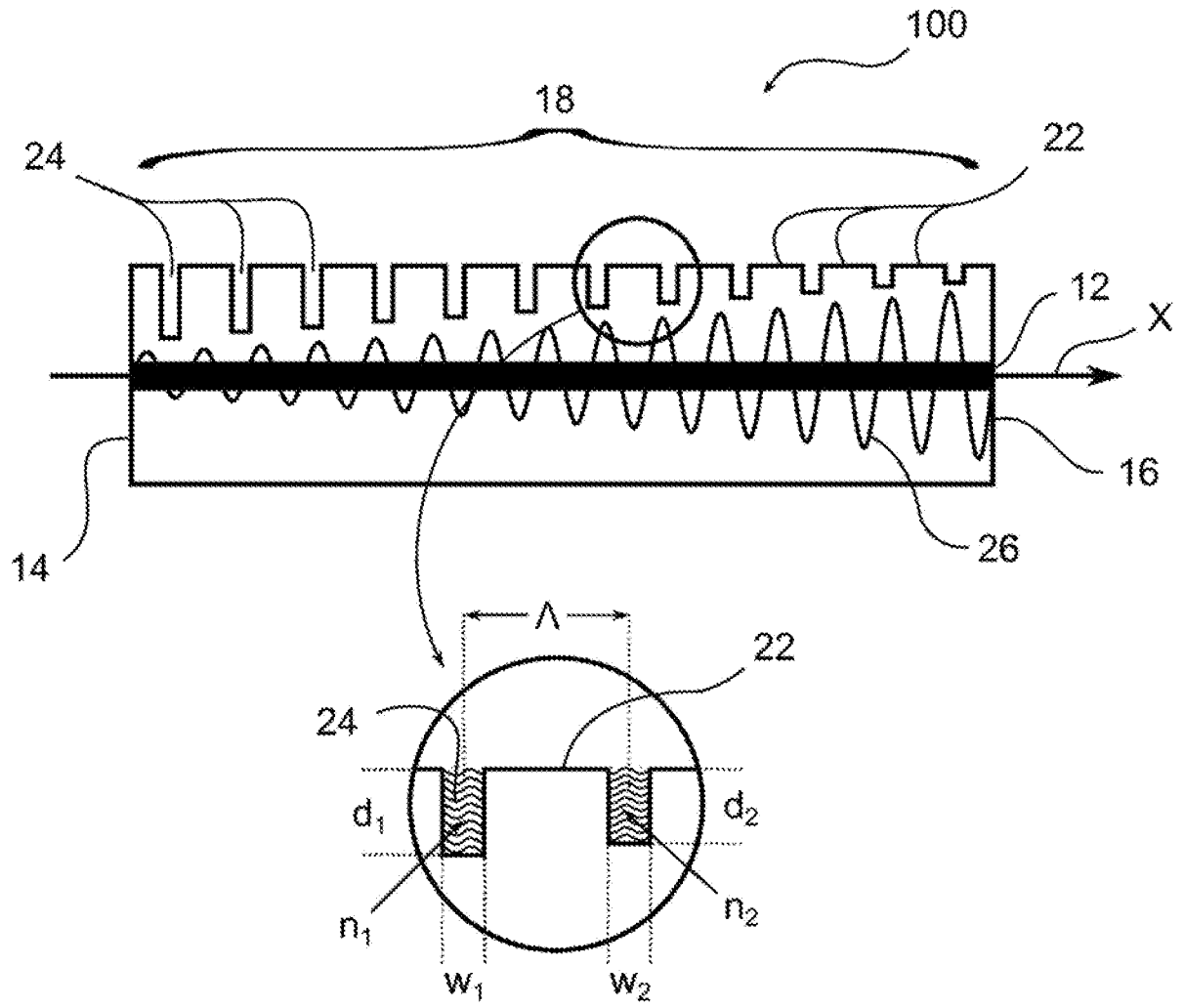


图3a

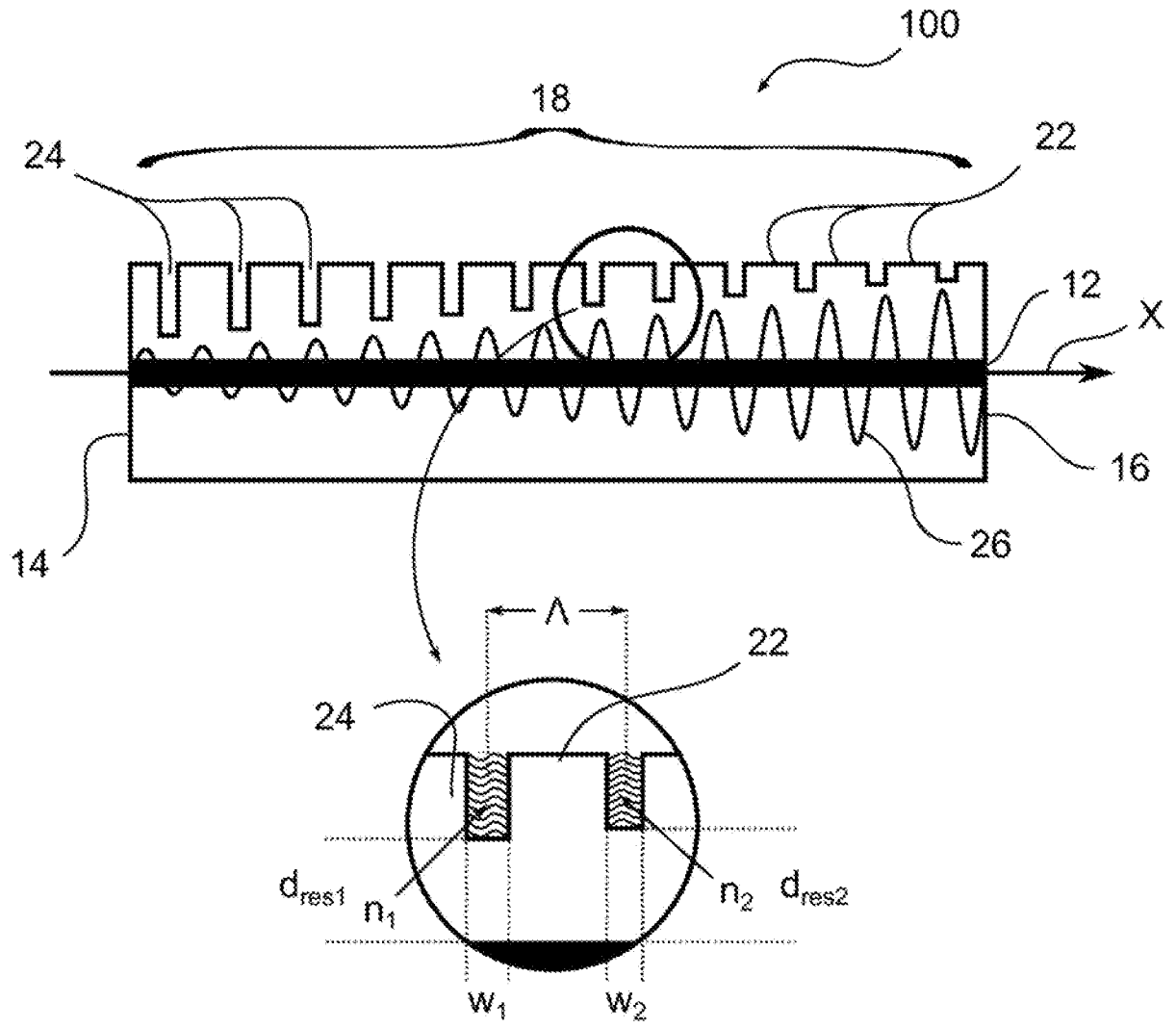


图3b

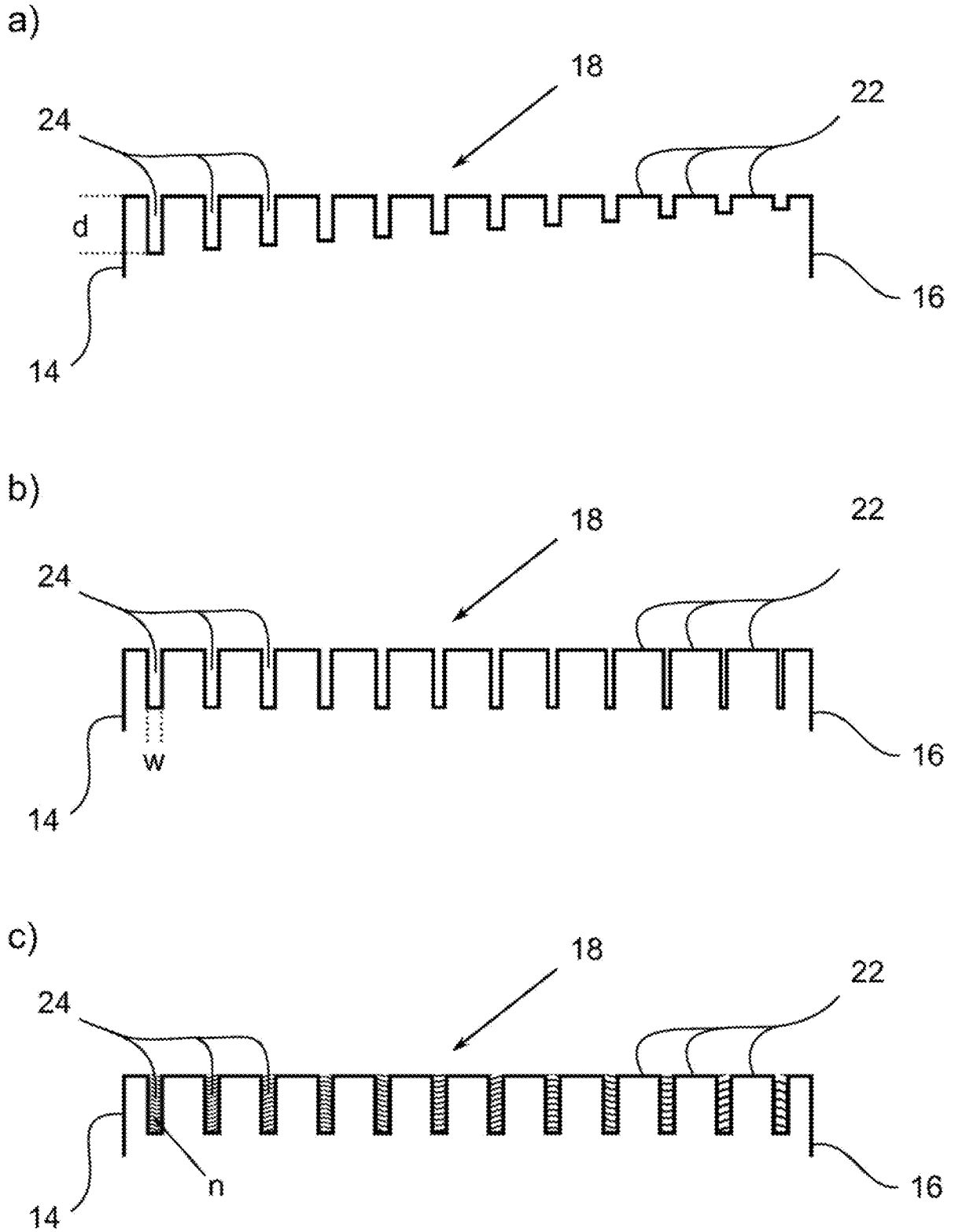


图4

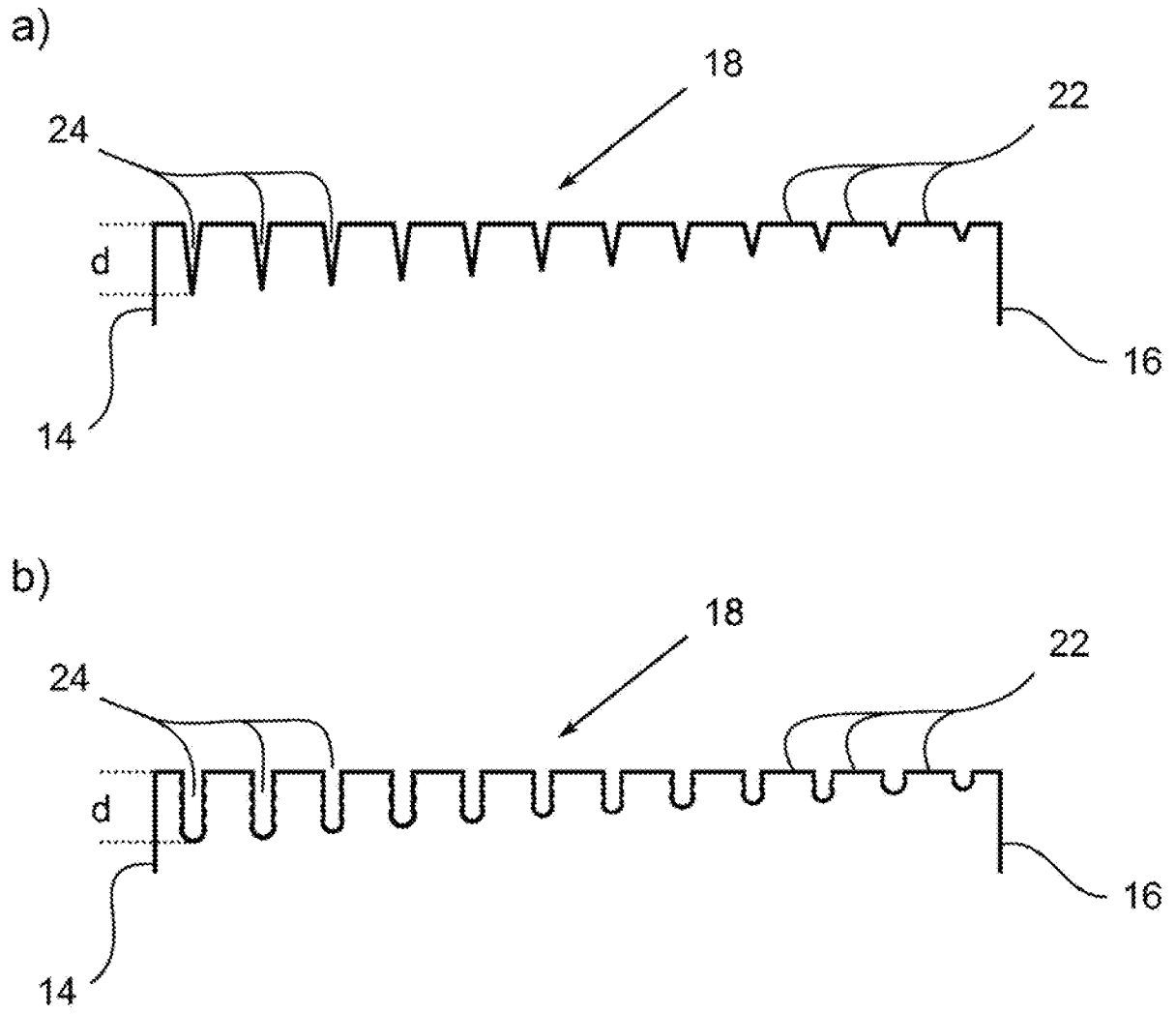
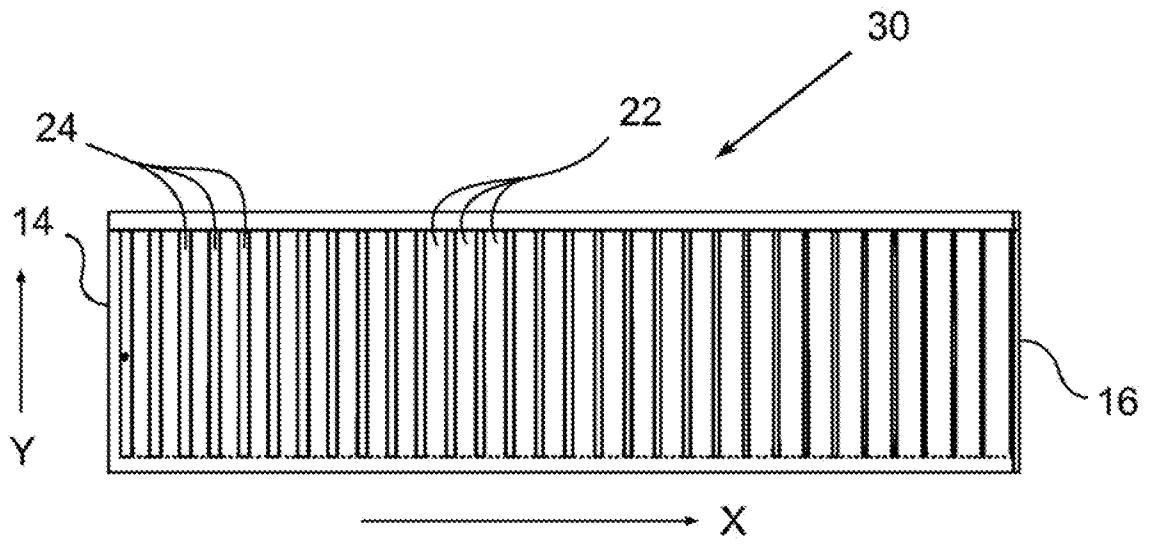


图5

a)



b)

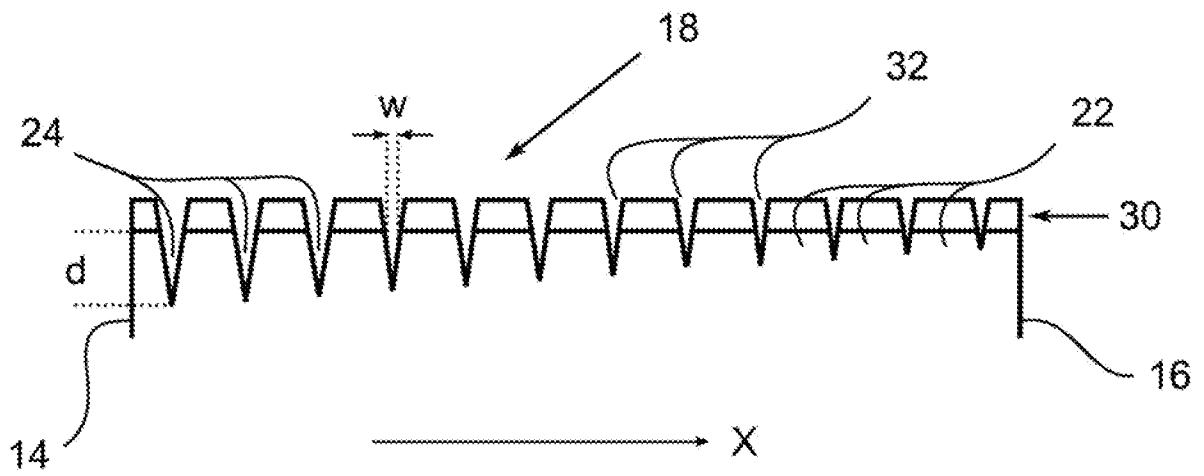


图6

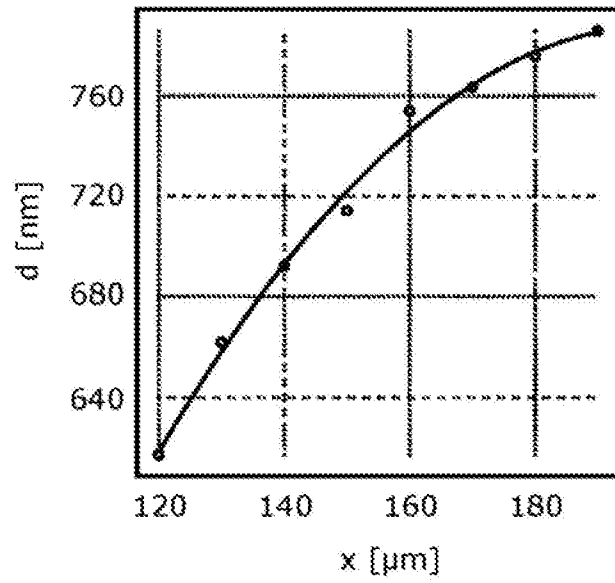


图7

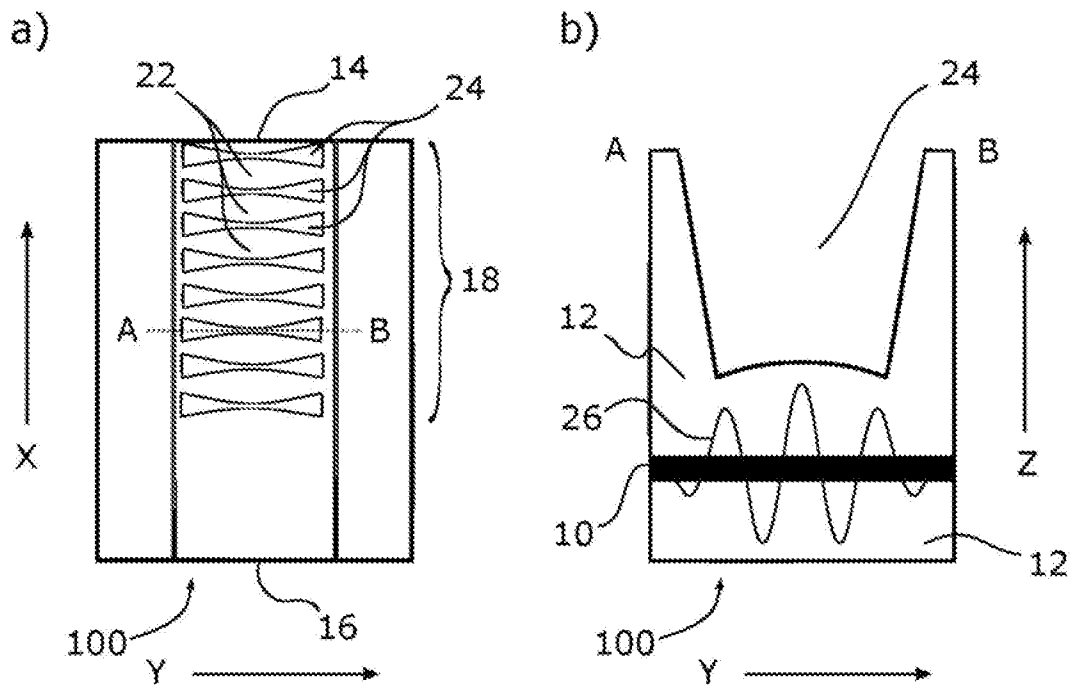


图8

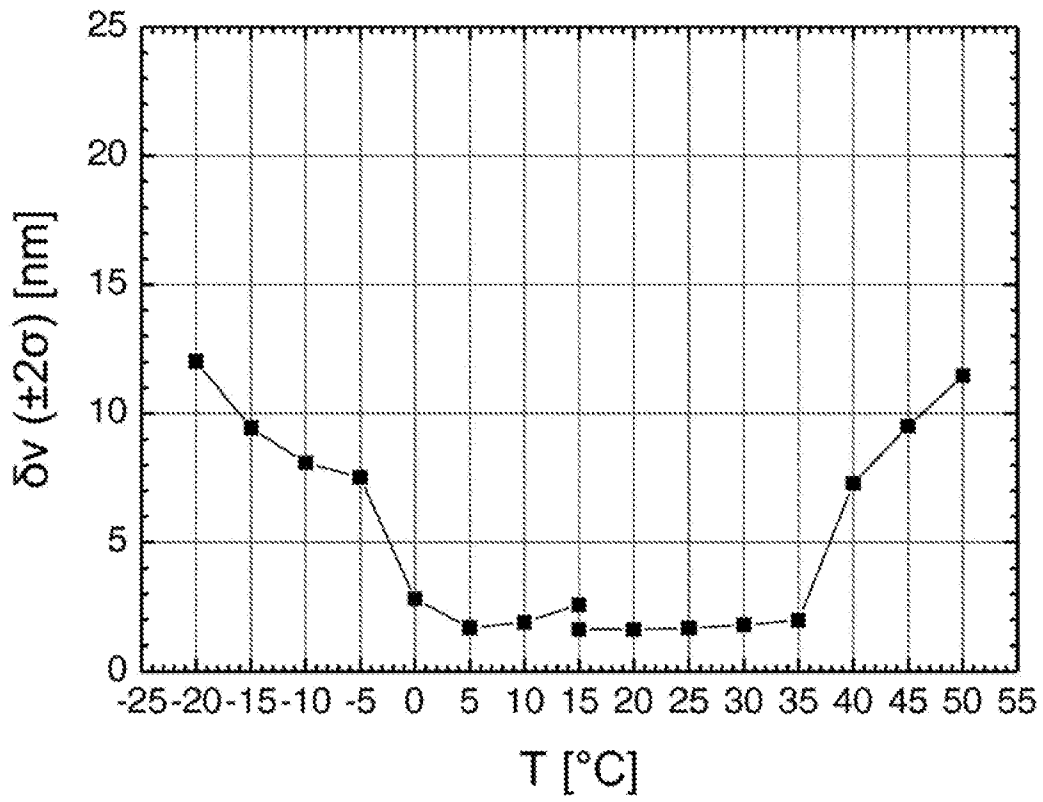
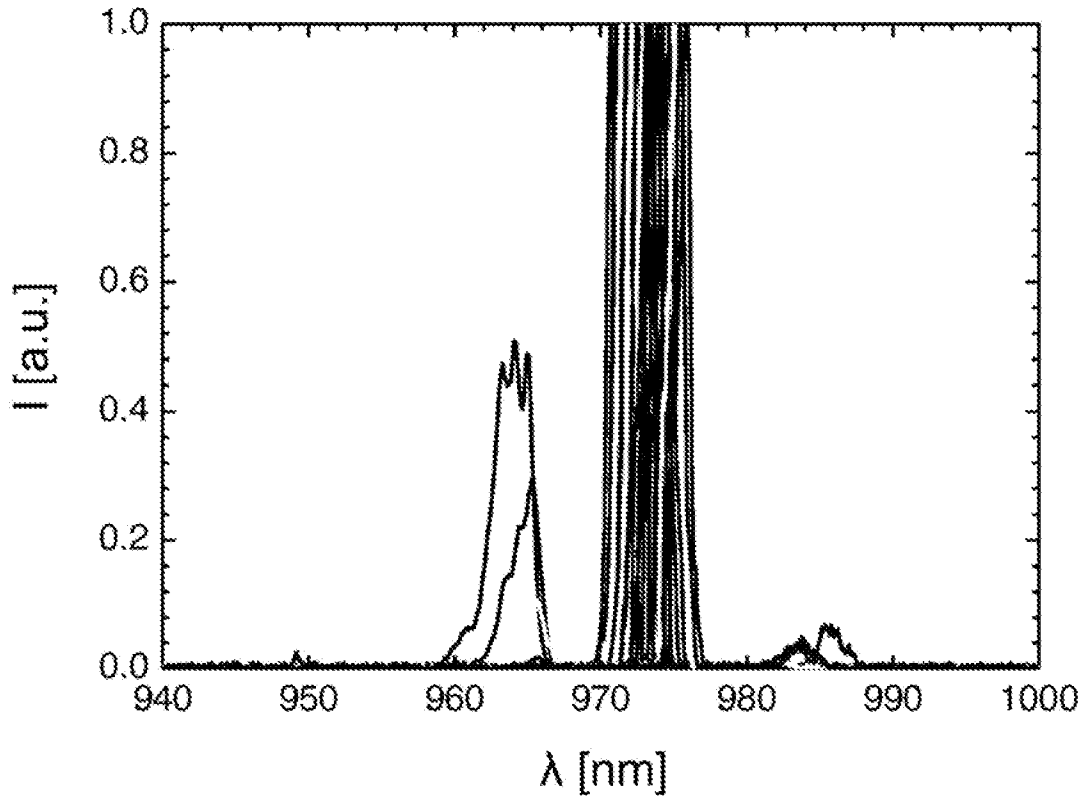


图9

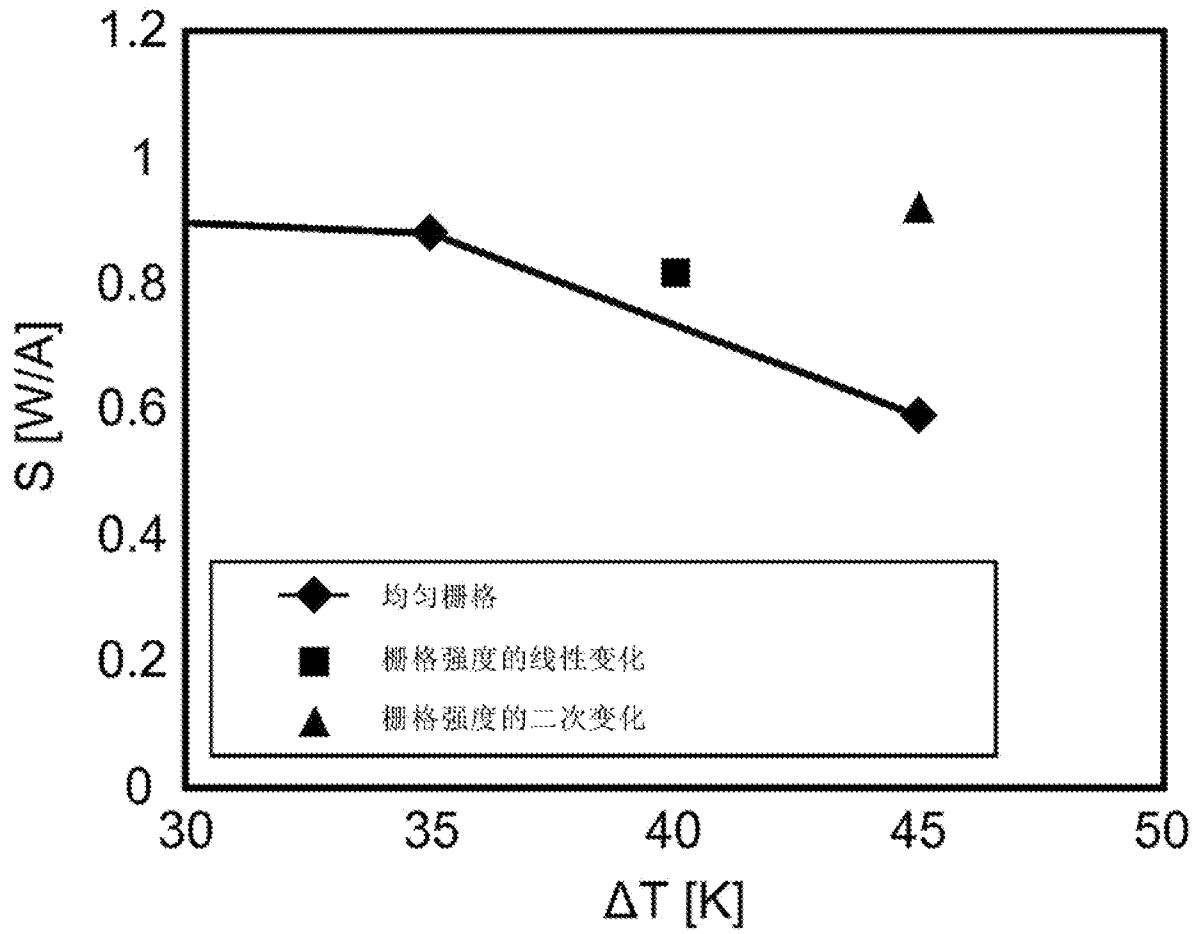


图10

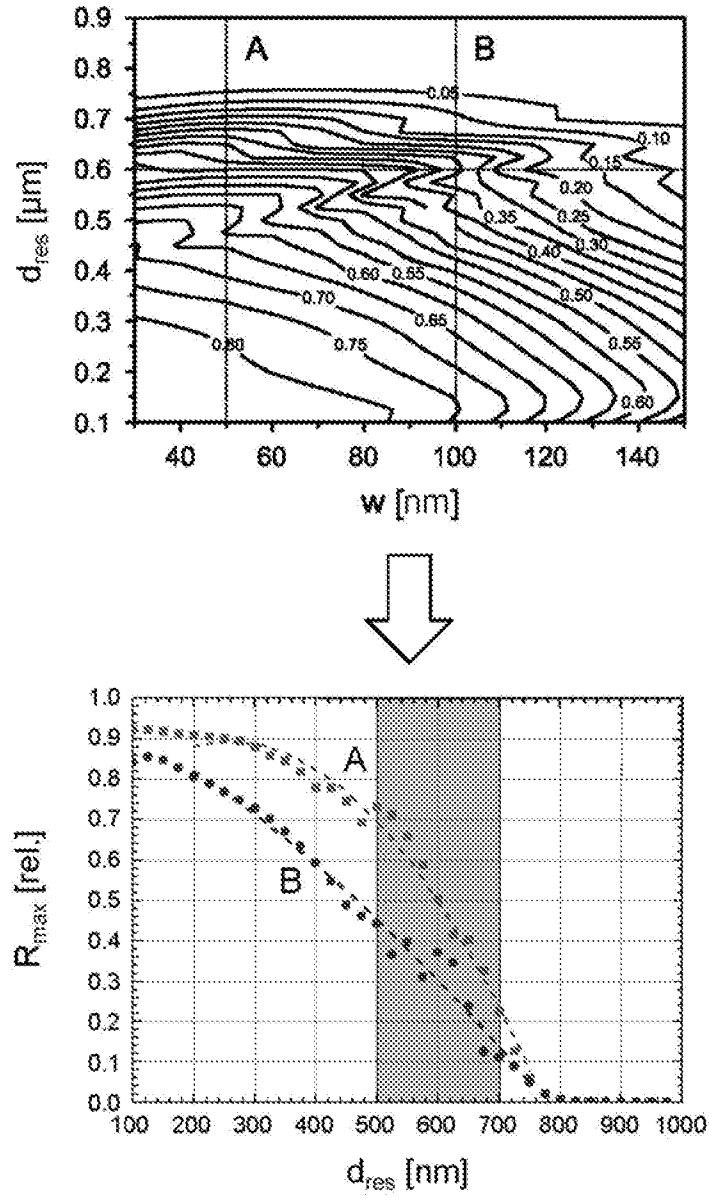


图11

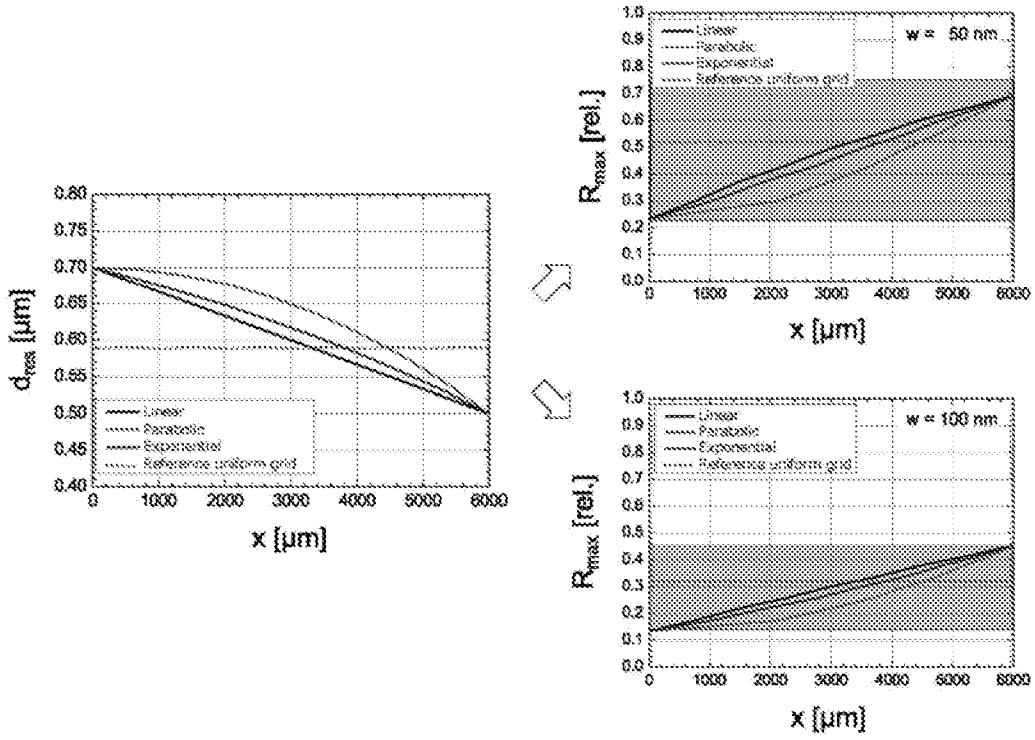


图12