



[12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 01104917.0

[45] 授权公告日 2004 年 12 月 15 日

[11] 授权公告号 CN 1180518C

[22] 申请日 2001.2.23 [21] 申请号 01104917.0

[30] 优先权

[32] 2000. 2. 24 [33] US [31] 09/512, 566

[71] 专利权人 朗迅科技公司

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 菲德里克·卡帕瑟

阿尔弗雷德·伊·乔

克莱尔·F·格马奇尔

阿伯特·L·胡奇森

德伯拉·L·思克

阿勒桑德罗·特里蒂库塞

审查员 肖 霞

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所

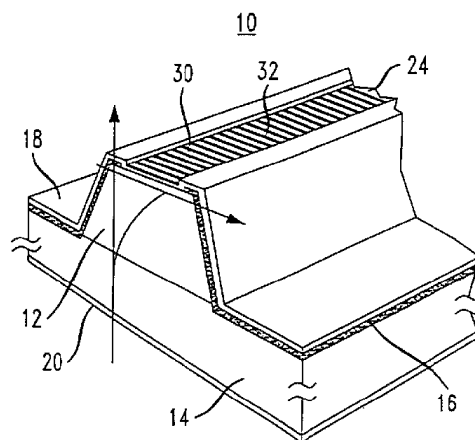
代理人 李德山

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 6 页

[54] 发明名称 分布式反馈表面等离子体振子激光器

[57] 摘要

由作为金属承载层的 DFB 结构形成了一种表面等离子体振子激光器结构, 因此形成了单模表面等离子体振子激光器。该 DFB 结构包括多层金属表面导向结构(例如覆盖了一层金层的钛条, 构成交替的 Ti/Au-Au 条带)。在一个实施例中, 激活区可以包括量子级联结构。



1. 一种包括表面等离子体振子激光器结构的物品，该结构包括：

具有主顶面的半导体衬底；

沉积的覆盖了部分上述半导体衬底主顶面的激活区，上述激活区形成为具有侧壁和顶面的脊；

沉积的覆盖了上述激活区顶面的金属表面等离子体振子承载层；

沉积的覆盖了上述激活区侧面和上述半导体衬底主顶面的暴露区域的绝缘层；以及

与上述半导体衬底主底面耦合的以利于电流通过激光器流动的电接触，

其特征在于所述表面等离子体振子激光器包括单模器件且所述金属表面等离子体振子承载层包含呈现周期性布拉格结构的分布式反馈(DFB)光栅结构。

2. 如权利要求 1 所述的物品，其中 DFB 光栅包括一个多层金属光栅。

3. 如权利要求 2 所述的物品，其中多层金属光栅包括双金属光栅。

4. 如权利要求 3 所述的物品，其中双金属光栅包括钛和金。

5. 如权利要求 1 所述的物品，其中周期性布拉格结构包括一个一级布拉格光栅。

6. 如权利要求 4 所述的物品，其中一级布拉格光栅包括 $2\mu\text{m}$ 的周期。

7. 如权利要求 1 所述的物品，其中周期性结构包括一个一级布拉格光栅层，该层包括形成于激光器激活区顶面上的第一金属和至少一个设置在第一金属光栅和剩余的激光器激活区的暴露部分上的第二金属层。

8. 如权利要求 7 所述的物品, 其中第一金属是钛, 且至少一种第二金属是金。

9. 如权利要求 8 所述的物品, 其中钛光栅层具有 10nm 的厚度, 且第二金属层金具有 300nm 的厚度。

10. 如权利要求 1 所述的物品, 其中激活区包括量子级联激活单元, 该单元包括多个完全相同的多层半导体重复单元, 各单元包括一个单元激活区和一个载流子注入器区, 该单元激活区具有一个较高能态和一个较低能态, 载流子从较高能态跃迁到较低能态导致波长为 λ 的光子的发射。

11. 如权利要求 10 所述的物品, 其中量子级联激活单元包括具有较高和较低小能带, 其间有小能隙, 且具有在较高小能带中的较高能态和在较低小能带中的较低能态的超晶格; 以及

载流子注入器区被选为使载流子易于从给定的重复单元的较低小能带向临近的下游重复单元的较高小能带输运。

12. 如权利要求 10 所述的物品, 其中光子发射波长 λ 由改变DFB量子级联表面等离子体振子激光器的周围温度来调节。

13. 如权利要求 1 所述的物品, 其中该装置是一个用于测量被测样品对红外辐射吸收的测量系统, 其中该测量系统包括单模红外激光辐射源, 该源包括

a) 权利要求 1 的 DFB 表面等离子体振子激光器;

b) 用于探测在通过一定量的上述被测样品后的单模红外激光辐射的探测器。

14. 如权利要求 13 所述的物品, 其中上述被测样品是在测量室中的被处理气体。

15. 如权利要求 13 所述的物品, 其中上述被测样品是无约束的气体。

16. 如权利要求 1 所述的物品, 进而包括与电接触连接的电流源, 上述电流源向 DFB 表面等离子体振子激光器提供激光加热电流以使单模激光辐射的波长根据激光加热电流变化。

17. 如权利要求 16 所述的物品, 其中激光加热电流包括一个持续时间远大于同时施加的电流脉冲的持续时间的锯齿电流。

分布式反馈表面等离子体振子激光器

技术领域

本发明涉及表面等离子体振子 (plasmon) 激光器的结构, 特别涉及到提供长波长单模运行的包括分布式反馈(DFB)结构的表面等离子体振子激光器。

背景技术

基于 III-V 族半导体材料的带间跃迁的关于长波长注入激光器的现有技术典型地局限于 $\lambda < 5\mu\text{m}$ 的波长范围, 只有铅盐激光器能提供波长在其余的相当大的中远红外部分的激光。但是, 目前已经证明运行在 InGaAs/AlInAs 异质结构中导带态间的次能带间跃迁的量子级联(QC)激光器是具有极其多用途的, 它覆盖了两个大气窗口的波长范围(3.4-13 μm), 并且在室温下给出高光功率。当形成了分布式反馈(DFB)器件(包括在紧邻激活区嵌入光波导中的光栅结构)时, 单模运行是可能的。由于内核(激活)区具有比周围(外部)包层区高的折射率, 可以获得光波传导。但是, 波长较长时, 光波导层(核及包层)的整体厚度变得难以控制, 并且自由载流子(尤其是在相对高掺杂的 n 型 QC 包层中)的光吸收会导致较大的信号损失。另外, 在较长波长下运行的 DFB 结构需要极深的蚀刻以形成光栅结构, 这使得再生变成问题, 并且只有将弱耦合的光栅留在远离激活区。所有这些困难导致了 DFB 结构未成为长波长应用的有吸引力的候选者。

但是, 电磁理论的麦克斯韦定律允许另一种类型的光约束发生在两种均匀物质的界面之间。存在这样的光波, 其特征为在与界面正交的两个方向上强度呈指数衰减, 条件是两种物质的介电常数(ϵ)具有符号相反的实部。对一个给定的辐射频率, 产生具有沿平行于界面和垂直于传播方向极化的磁场(即横磁(TM)极化)的一种单一约束模式。

具有负实部的介电常数通常出现在带电谐振子的电磁响应中, 尤其是在频率高于振子谐振点 ω_0 直至频率 ω_L 时, 其中 $\epsilon(\omega_L)=0$, 并

且能传播纯纵模式。在金属或高掺杂的半导体中存在的近自由电子对横向激发行为如同精确零谐振频率的简谐振子，而同时显示出非常高的 ω_L ，一般在可见或 UV 波长范围。后者名为“等离子体频率” ω_P ，是电荷密度振荡的频率。因此，金属有一个极宽的波长范围，其中 $\text{Re}[\epsilon] < 0$ ，且金属能支持界面约束的电磁波，该波被称为“表面等离子体振子 (surface plasmon)”。最近已经在中红外半导体激光器领域里探索了用表面等离子体振子代替较常规的多层电介质光频波导的可能性，但是这些表面等离子体振子器件的边缘特性还无法与那些传统的层式结构竞争。

因此，现有技术有这样一个需求，即对于相对长波长的激光器（即 $\lambda > 15\mu\text{m}$ ），既不要厚得无法接受，在技术上也不要象制造 DFB 器件那样困难。

发明内容

本发明提出了能满足该需求的方案，它涉及一种表面等离子体振子激光器的结构更具体地，涉及提供单模、长波长（例如 $\lambda = 17\mu\text{m}$ ）发射的包括分布式反馈(DFB)结构的表面等离子体振子激光器。

表面等离子体振子激光器包括由绝缘脊构成的激活区，它还包括沿该脊纵向设置的与激活区邻接的金属表面层。该结构导致表面等离子体振子传播的形成，其中发现在波长大于 $15\mu\text{m}$ 时在金属中与穿透深度（即趋肤深度）相关的能损被大大减低了。伴随波导层厚度的减小（从现有技术的近 $9\mu\text{m}$ 减小至小于 $4\mu\text{m}$ ），所产生的大波模约束 Γ 有益于用来制造长波长激光器。

按照本发明所述，金属表面层包括一个金属栅状（即周期性的）表面结构，因此形成了能单模发射的 DFB 表面等离子体振子激光器。在一个实施例中，钛条首先被沉积到激活区的裸露表面，接着是一层连续的金层。所形成的 Ti/Au-Au 光栅提供了单模表面等离子体振子的辐射输出，其中改变器件运行温度可以“调谐”输出波长。

在本发明的一个具体实施例中，DFB 表面等离子体振子激光器的激活区可包含量子级联(QC)结构，包括多个基本相同的重复单元，各重复单元包含一个或多个量子井。载流子连续从高能态向低

能态跃迁导致光子发射，光子的能量取决于重复单元的结构和具体排列。

本发明的其它更进一步优点和装置将在下面的讨论及对附图的参照过程中显现出来。

附图说明

图 1 是一个根据本发明构成的 DFB 表面等离子体振子激光器的等角投影视图；

图 2 是图 1 中器件的前平面示意图；

图 3 是图 1 中的单模 DFB 表面等离子体振子激光器侧视剖面图；

图 4 是一个曲线图，它包含一个根据本发明带有常规电介质波导的表面等离子体振子激光器的示例的波模强度和介电常数实部；

图 5 是显示一个表面等离子体振子激光器的例示的 L-I 特性和电流-电压特性的曲线图；

图 6 显示了从一个本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器的示例的单模输出；

图 7 显示了关于本发明的 DFB 量子级联(QC)表面等离子体振子激光器的激活区的一个示例导带图；

图 8 描绘了对本发明的单模 DFB-QC 表面等离子体振子激光器的输出波长的“调谐”能力，波长的调谐是激光器周围温度的函数；

图 9 显示了在作为点传感装置的一部分的情况下的一个本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器的使用示例；

图 10 显示了一个包括作为全体传感装置的本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器的遥感系统的示例。

具体实施方式

中远红外半导体激光器通常被用在气体传感应用中，其中用到了高分辨和高灵敏光谱技术。因而，为此目的需要单模器件。在大多数情况下，使用 DFB 谐振器（包含一个合适周期和长度的光栅）的 QC 激光器或二极管激光器被用作单模器件。这种结构引入了折射率 n_{eff} 和适合于在所有可能的纵波模式中与光栅周期最佳匹配的光波模式的衰减系数 α_w （或有效网络增益）调制。

在图 1 中显示了一个根据本发明构成的单模表面等离子体振子激光器 10 的等角投影视图。激光器 10 包括激活区 12，它由例如在 InP 衬底 14 上生长的 InGaAs/AlInAs 构成。激活区 12 被形成一个脊（例如用湿法化学刻蚀），在脊旁边和 InP 衬底 14 顶面上沉积有绝缘体 16。二氧化硅即是用于此目的的示例性绝缘体。激光器 10 的前平面视图被显示在图 2 中，它清晰地显示了在激活区 12 侧面和衬底 14 顶面上的绝缘体 16 的位置。然后（例如，用电子束沉积）形成顶电接触 18 和底电接触 20，留下激活区脊 12 顶面 22 一个宽的裸露部分用于接下来沉积金属表面等离子体振子承载层 24。

根据本发明，电磁波模的表面等离子体振子性质有利于给激光器中加入 DFB 结构而无须使用任何刻蚀过程。已经发现对表面等离子体振子结构的表面金属层的特定金属的选择强烈影响波模的穿透深度及折射率和衰减损失因子。在一个实施例中，金属层 24 可以包括一层金（例如约 300nm 厚），它对介电常数实部给出相对大的负值（在 $\lambda \sim 17\mu\text{m}$ 时 $\text{Re}[\epsilon_{\text{Au}}] \sim -1.1 \times 10^4$ ）和在金属中相对浅的穿透深度；也可以使用钛（它显示出低得多的介电常数——在 $\lambda = 17\mu\text{m}$ 时 $\text{Re}[\epsilon_{\text{Ti}}] \sim -1 \times 10^3$ ——和较大的穿透深度）。例如，在沉积较厚（如 300nm）的金层之前先沉积一层较薄（如 10nm）的钛，相对于纯金，就产生了折射率变化 $\Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}} \sim 1.8 \times 10^{-3}$ 和衰减损失变化 $\Delta \alpha_w/\alpha_w \sim 1.5 \times 10^{-2}$ 。在横跨本发明的表面等离子体振子激光器的示例的脊中将空间调制引入这种变化，就能构成单模长波长的 DFB 器件。如图 1-3 中所示的实施例的一个示例包括双金属 Ti/Au-Au 结构。具体地，光接触平版制版（或其它合适的工艺）可以被用来形成钛条 30 的一级布拉格光栅（显示出 50% 的标称负载因子），如图 3 所示，其中使用了 10nm 的钛沉积。接着蒸发的相对厚（比如 300nm）的金层 32 有效地形成了横跨激活区 12 顶面 22 的 Ti/Au 和纯金条 32 的交替次序，如图 3 所示。尽管这个特定的实施例使用了双金属结构，但也可以采用各种其它的多金属光栅结构，例如可以采用三金属光栅结构。

介电常数 ϵ 、折射率 n 和消光系数 k 之间的关系 $\text{Re}[\epsilon] = n^2 - k^2$ 暗示具有负的 $\text{Re}[\epsilon]$ 的材料通常有很大的吸收性。由于这个原因，被导向

波模的表面等离子体振子的衰减系数 α 强烈依赖于在金属承载层（图 1 和 2 中的器件 10 中的层 24）中穿透（趋肤）深度 δ ，随后者的减小而减小。若金属（层 24）的介电常数为 ϵ_1 ，半导体（激活区 12）的介电常数为 ϵ_2 ，穿透深度 δ 可以表示如下：

$$\delta = \frac{1}{2} \left| \operatorname{Re} \left[\frac{\omega \epsilon_1}{c} \sqrt{\frac{-1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \right] \right|^{-1}$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left| \operatorname{Re} \left[\frac{\omega \epsilon_1}{c} \sqrt{\frac{-1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \right] \right|^{-1}$$

其中 $\omega/2\pi$ 是电磁波频率， c 是真空中光速。从上面公式得出，大的负 $\operatorname{Re}[\epsilon_1](k^2 \gg n^2)$ 意味着小 δ ，它带来了低光损。从上面公式得出，在实正 ϵ_2 的情况下容易得出衰减 α ：

$$\alpha = \frac{\epsilon_2^{3/2} \operatorname{Im}[\epsilon_1]}{\{\operatorname{Re}[\epsilon_1](\epsilon_2 + \operatorname{Re}[\epsilon_1])^3\}^{1/2}} \frac{\omega}{c}$$

$$\alpha = \frac{\epsilon_2^{3/2} \operatorname{Im}[\epsilon_1]}{\{\operatorname{Re}[\epsilon_1](\epsilon_2 + \operatorname{Re}[\epsilon_1])^3\}^{1/2}} \frac{\omega}{c}$$

依赖于频率的金属介电常数的一级近似可以由简单 Drude 自由载流子表达式表示：

$$\operatorname{Re}[\epsilon_1(\omega)] = \epsilon_\infty \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \right)$$

$$\operatorname{Re}[\epsilon_1(\omega)] = \epsilon_\infty \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \right)$$

$$\operatorname{Im}[\epsilon_1(\omega)] = \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}$$

其中 ω_∞ 是本底介电常数， γ^{-1} 是唯象（phenomenological）散射时间。

根据本发明已经发现当辐射波长增加时，由于 ϵ 的洛伦兹依赖，表面等离子体振子波导变得较少损耗。实际上，在微波应用中通常使用金属波导，并且尽管它们呈现较复杂的三维几何形也允许对于 TE 和 TEM 模式的传播，但在最简单的设计（例如“微米条带”）中，基本的 TM 模式又呈现等离子体振子的本质。

图 4 显示了用传输矩阵方法计算出的与表面等离子体振子对应的介电曲线，以及约束因子 Γ （定义为光波模对激活材料的归一化积

分), 波导衰减 α_w 和模型有效折射率 n_{eff} 的值。作为比较, 图中还显示了与现有常规技术的半导体包层光波导相联的波模曲线。从图 4 的曲线图中明显看出, 外延生长的厚度值从现有技术的将近 $9\mu\text{m}$ 减少至不到 $4\mu\text{m}$, 同时集中了激活材料中的场强, 因此将 Γ 从 0.47 提高至 0.81。

图 5 显示了运行在脉冲模式 (50ns 脉宽, 5kHz 负载因子) 下的 1.4mm 长, $34\mu\text{m}$ 宽的深刻蚀的脊波导激光器的光输出(L)-电流(I) (实线) 和电流-电压(V) (虚线) 特性。光功率是以~50%的采集效率从单个面上测量的; I-V 特性是在 5K 的温度下测量的; 而 L-I 曲线则是在图中指出的温度下显示出来的。

图 6 显示了一个本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器的示例的输出。如图所示, $16.2\mu\text{m}$ 波长单模脉冲发射是清晰明显的, 其边模被很好地压至低于 10^{-3} 的水平。

在本发明的一个具体实施例中, 器件的激活区 12 可以包括量子级联(QC)结构。一般地, 量子级联结构由大量超晶格/注入器状态构成, 这可以用例如固体源 MBE 在 InGaAs/AlInAs 材料系统中生长而成, 并与 InP 衬底晶格相匹配。图 7 显示了一个 QC 超晶格/注入器结构示例的导带图的示例。具体地, 两种纳米厚的不同半导体层的周期性交替, 将导带劈裂成被能隙 (“小间隙”) 分割开的较窄的能带 (“小能带”), 可以在不同周期超晶格 QC 材料中获得能量位差。通过单极电子注入经小能带传输能够在第一能隙边上的能态之间获得激光作用。根据 QC 器件的作用, 多个超晶格区被特别设计的注入器连接起来, 这种注入器在适当的偏压条件下从一个超晶格的较低的小能带引出电子, 并将它们注入下一个超晶格的第二个小能带中。以这种方式, 穿过超晶格区/载流子注入器区的各单电子能够发射许多光子, 导致大的微分量子效率 (通常远大于一)。由于选择定则导致的本征 TM 极化, 半导体异质结中的亚能带间和小能带间跃迁特别有利地适合于表面等离子体振子波导。

如图 7 所示具体图示了施加 20.5kV/cm 偏压下的能带结构。对一个激活区/注入器级实际层厚以纳米为单位 (从左向右, 从第一个势垒开始) 为: 1.5/ 6.4/ 0.6/ 7.2/ 0.7/ 8.3/ 0.7/ 9.0/ 0.6/ 9.6/ 2.5/ 4.7/

2.0/5.2/1.7/5.2/1.5/5.2。用黑体符号表示的 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 层（能量势垒）与 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 势阱交替。有下划线的层被掺杂至 $n_e=2.5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ；斜体部分表示注入器区。正象激光跃迁（由激活区中的波浪形箭头指出）一样，图中还显示出激活区和注入器区中相关波函数的方形模数。

如前所述，用改变器件周围温度从而改变它的有效折射率来“调谐”DFB表面等离子体振子激光器的激光频率是可能的。图8包括一个DFB表面等离子体振子激光器的示例的调谐曲线（并包括插入的一个不同波长下记录的光谱）。在图8所示的例子中，采用 $23\mu\text{m}$ 宽和 1.5mm 长的单模激光器，它具有 $2\mu\text{m}$ 周期的Ti/Au-Au周期性光栅结构。如图所示，温度变化范围为 $5\text{-}120\text{K}$ ，产生的波长变化从约 $16.18\mu\text{m}$ 到将近 $16.26\mu\text{m}$ 。虽然显示的依赖关系明显是非线性的，但在最高温度下可以定义一个线性的调谐系数。对于显示在图8中的具体结果，调谐系数为 1nm/K 是可以接受的近似。

必须了解上述的DFB表面等离子体振子激光器结构仅仅作为可以由本发明的原则设计出的许多可能的具体实施例的说明。熟悉本技术的人员可以根据这些原则设计出不背离本发明精神和覆盖范围的大量不同的其它装置。一般地，对这类长波长单模器件存在许多不同应用。图9即显示了其第一个应用，其中简略描述了一个包含本发明的DFB表面等离子体振子激光器40的点传感装置。通常激光器被装在一个控温台上以粗略地进行波长调谐。来自DFB表面等离子体振子激光器40的中红外辐射42通过一个常规的气体室44（也可选择多通室），激发出轰击常规探测器48的辐射46。来自探测器48的电输出（与一个适当的调制信号，例如来自调制信号发生器50的 1.2kHz 正弦波一起）被提供给锁定放大器50，并且锁定放大器50的输出被提供给计算机54以进行数据分析和格式化。然后该数据以任何合适的方式，如在一个显示器60上被显示和/或存储。DFB表面等离子体振子激光器40被以适当的电流泵浦。例如，一个来自锯齿波电流发生器56的低频电流锯齿波（如周期为 250ms ），来自偏置电流发生器58的短偏置脉冲（如脉宽 5ns ，周期 $2\mu\text{s}$ ），和来自调制电流发生器的调制信号被提供给组合器62，带有叠加电

流脉冲的合成的电流锯齿波和正弦波被用作 DFB 表面等离子体振子激光器 40 的脉冲输入。电流锯齿波被用来对温度在预定的范围内进行扫描，该脉冲引起短激光脉冲发射。脉冲波长在一个波长范围内缓慢扫描，而吸收被作为波长的函数确定下来。因此，在一定波长范围具有吸收线的气体室中存在吸收的很容易被探测，从而可以识别出该气体。熟悉本技术的人员会认识到某些常规的装置在图 9 中没有显示出来。例如调整测量在计算机控制下进行，还需要对计算机 54 的输入输出。另外，还有各种其它装置可以用来启动激光器并调谐温度/波长。图 9 中描述的装置仅被认为是一个示例，并不局限本发明说明的范围。

图 10 简单描述了一个遥感系统 60，其中发射源 62（例如一个工厂）放出气态排放云 64。根据本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器 66 发出辐射 68，它通过气态排放云 64 传播并被反射（如用角反射器 67）。然后反射的辐射 69 被探测器 70 探测到。DFB 表面等离子体振子激光器 66 可以用任何适当的方法泵浦（例如，如上述与图 9 相关的描述）并且探测器 70 的输出能够以任何适当的方式被利用（同样如前所述）。镜子或其它合适的反射器可以被用来代替角反射器 67。反射器可以装在飞机上或任何高的地方，包括被监视的烟囱上。当然探测器也可以被装在飞机上或任何高的地方。一般地，任何导致激光器和探测器放置在一条视线上的安排都是可用的。

本发明的 DFB 表面等离子体振子激光器一般将被装在适当的机盒里以便保护和控制。该包装通常会包括冷却装置（比如水冷或温差电冷却），用于控温的反馈环用的温度传感装置（比如热电偶）以及向激光器施加泵浦电流的装置。可选地，机盒还可包括用来控制激光器输出功率的探测装置。该机盒通常具有对激光辐射透明的窗，并且通常被抽空或充满惰性气体。

图 1

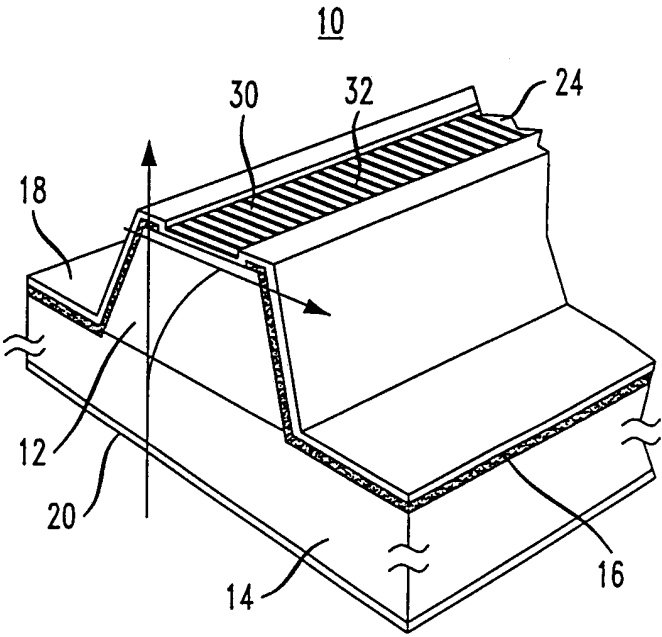


图 2

10

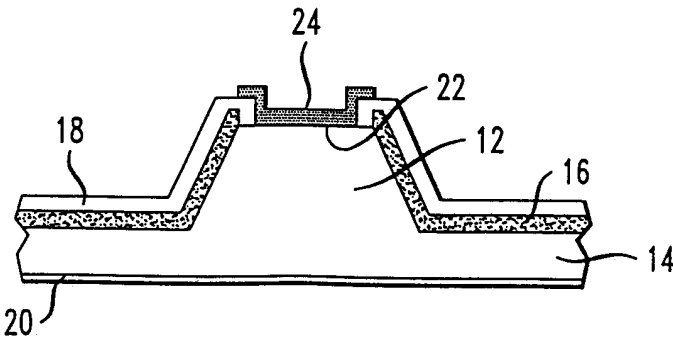


图 3

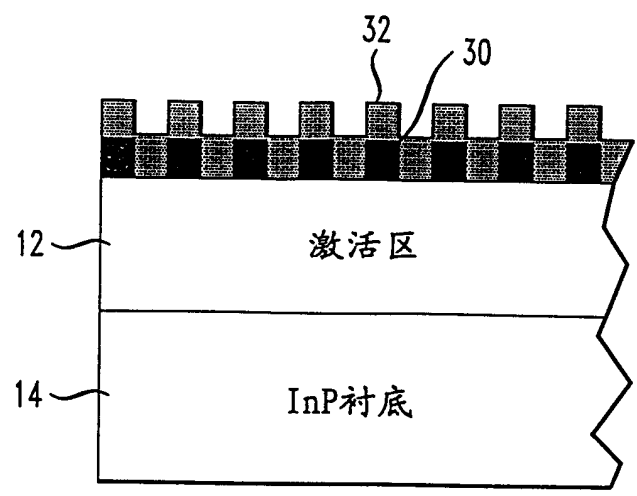


图 4

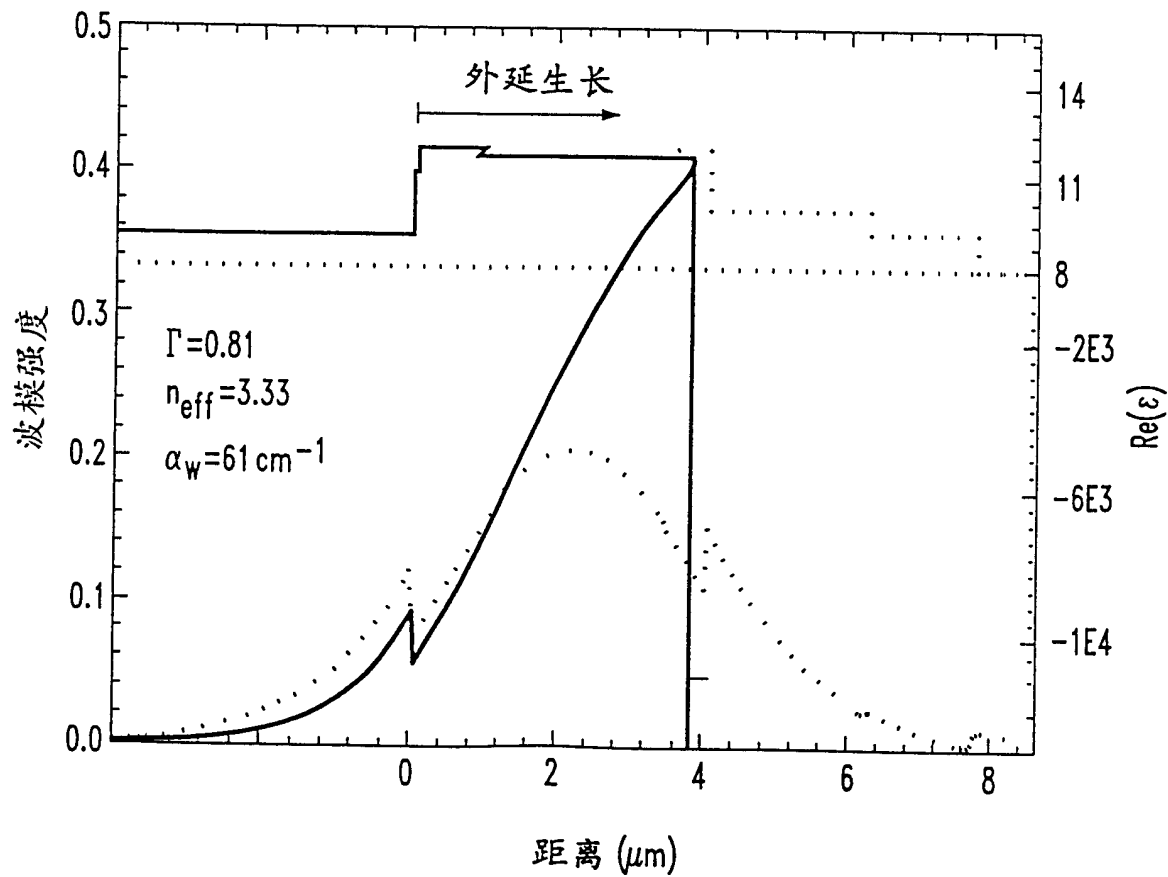


图 5

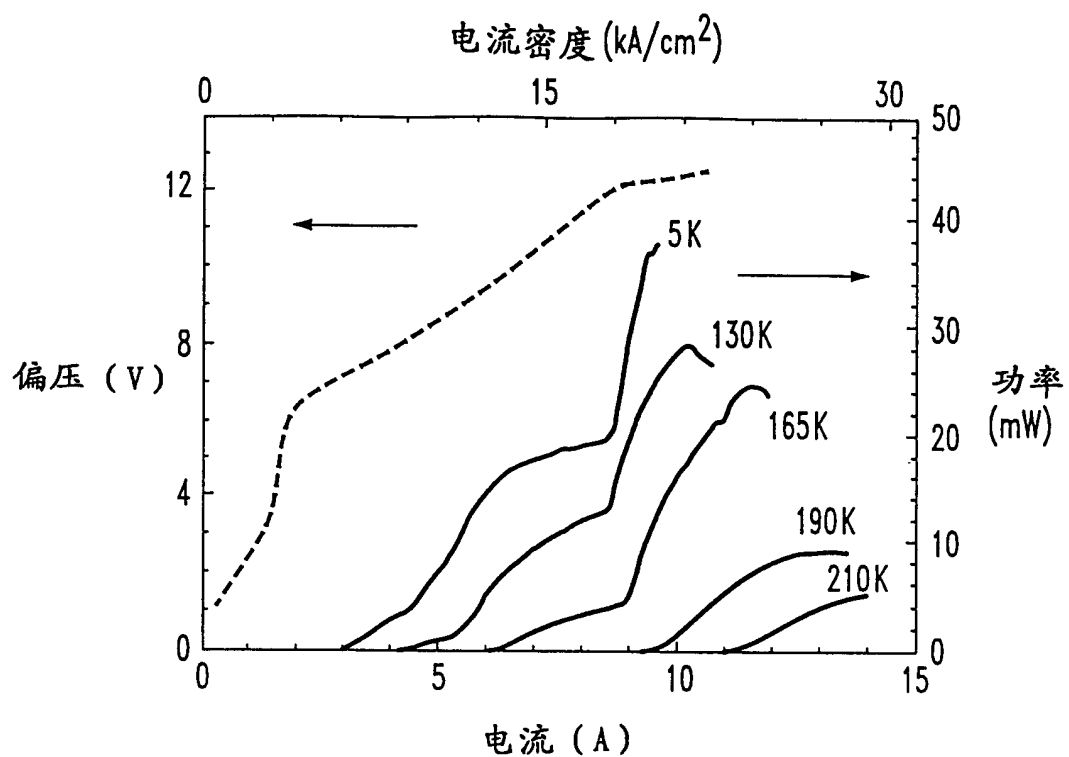


图 6

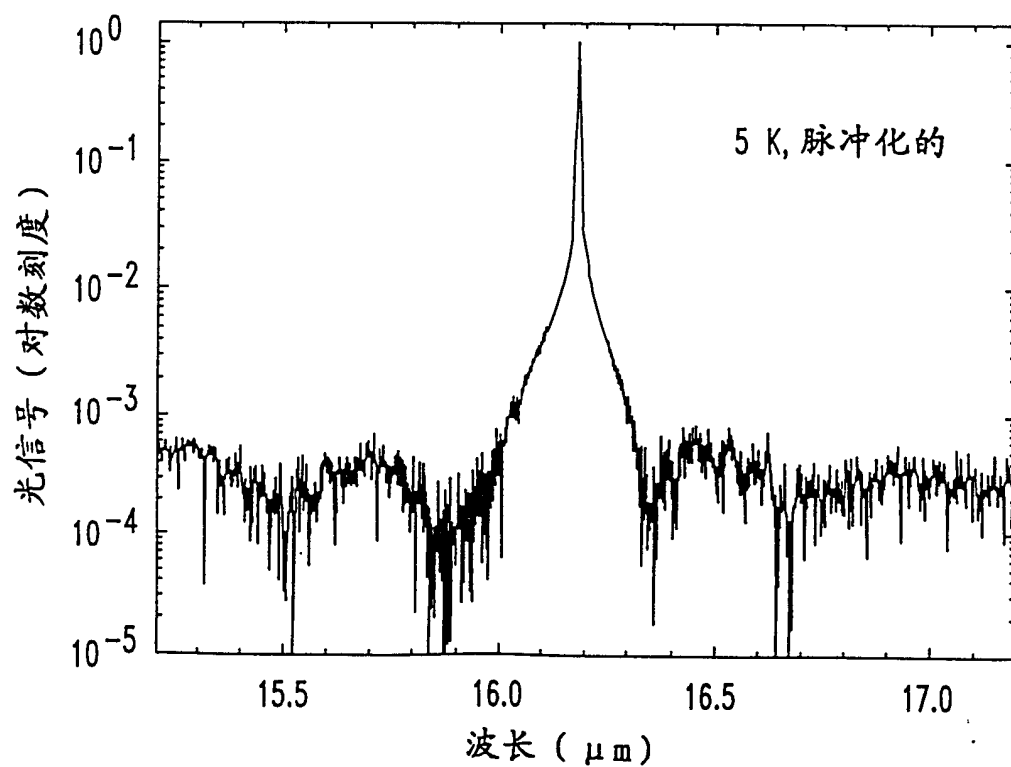


图7

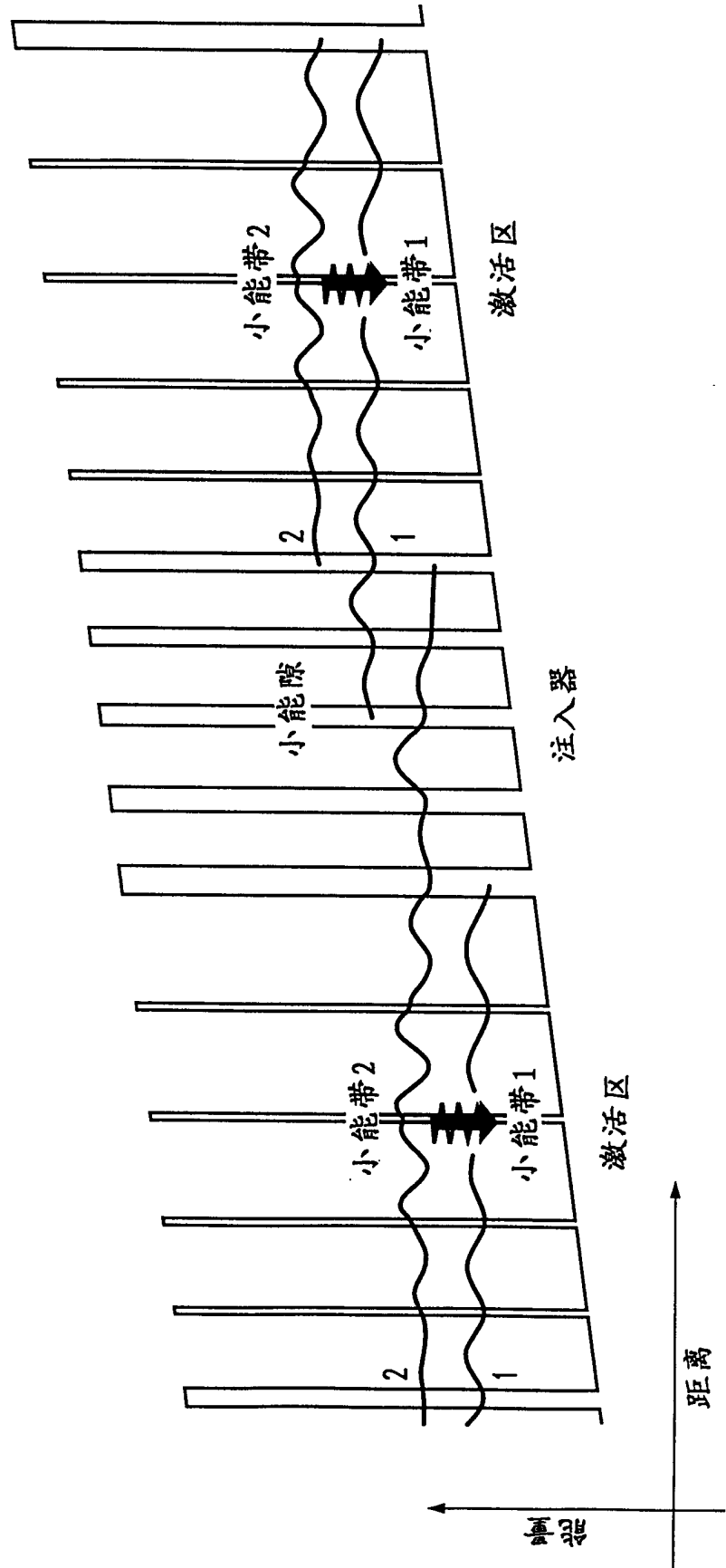


图8

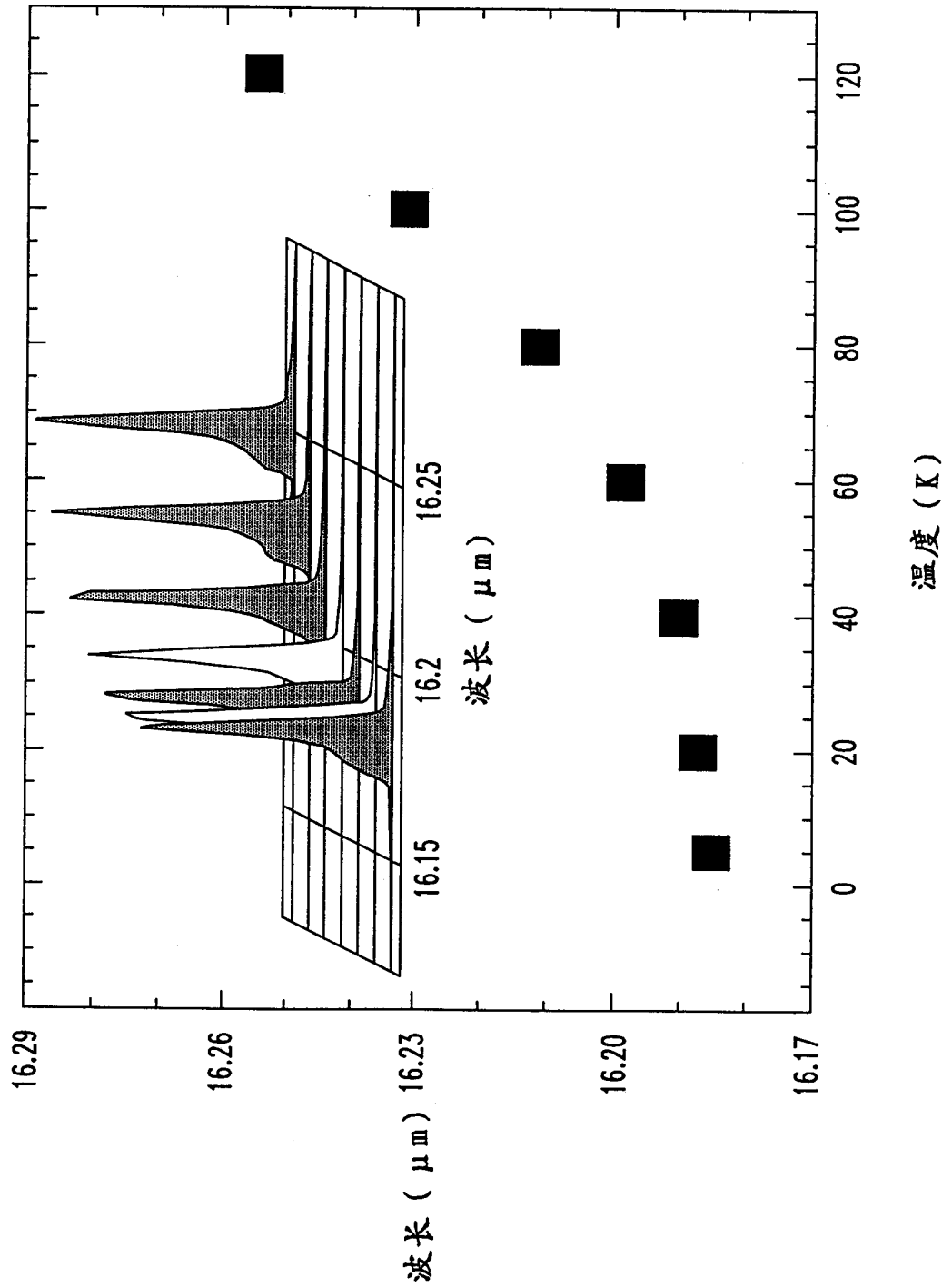


图 9

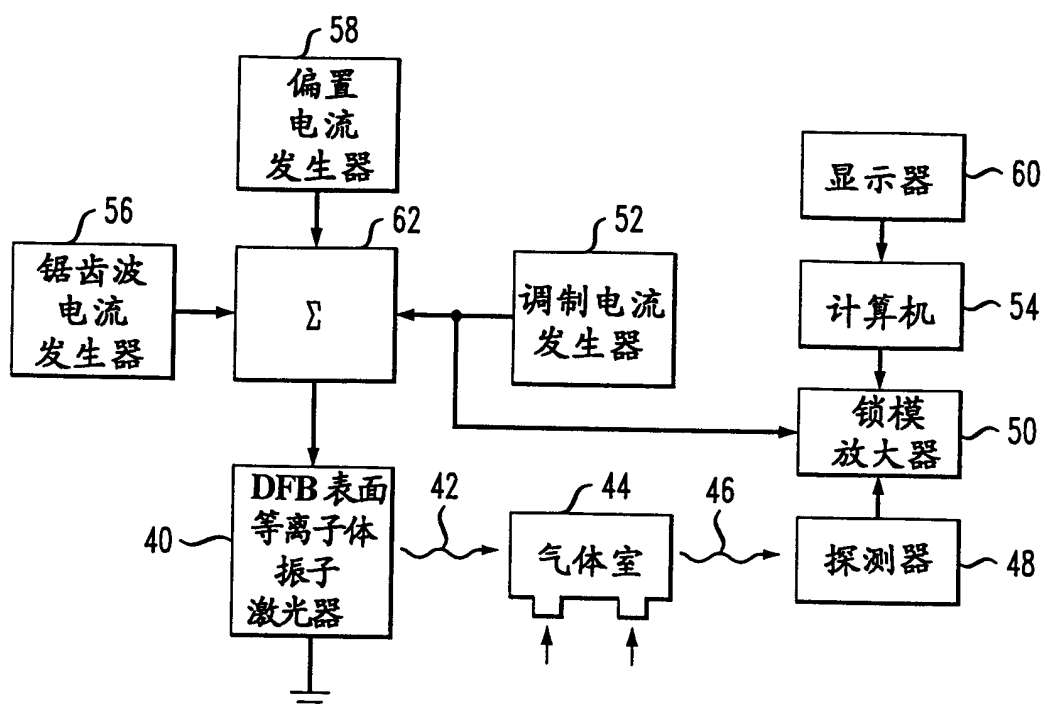


图 10

