

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480034914.4

[51] Int. Cl.

H01S 5/20 (2006.01)

G02B 6/10 (2006.01)

H01S 5/343 (2006.01)

G02B 6/42 (2006.01)

[45] 授权公告日 2009 年 1 月 21 日

[11] 授权公告号 CN 100454698C

[22] 申请日 2004.9.16

[21] 申请号 200480034914.4

[30] 优先权

[32] 2003.10.11 [33] GB [31] 0323905.0

[86] 国际申请 PCT/GB2004/003959 2004.9.16

[87] 国际公布 WO2005/043702 英 2005.5.12

[85] 进入国家阶段日期 2006.5.25

[73] 专利权人 英坦斯有限公司

地址 英国格拉斯哥

[72] 发明人 仇伯仓

[56] 参考文献

US5923689A 1999.7.13

US2001/0028668A1 2001.10.11

US5815521A 1998.9.29

US6028877A 2000.2.22

CN1347581A 2002.5.1

审查员 佟晓惠

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 陶凤波 侯 宇

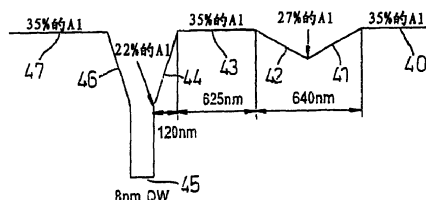
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 8 页

[54] 发明名称

半导体波导器件中输出光束发散的控制

[57] 摘要

一种整合了束控制层(42, 41)以减小远场和束发散的半导体激光器件。在所述束控制层中,通过提供第一子层(42)和第二子层(41),在第一子层中性质逐渐从第一水平变化到第二水平,在第二子层中性质逐渐从所述第二水平变化到第三水平,从而使半导体材料的物理性质作为束控制层的深度而变化。在优选设置中,在束控制层中半导体的导带边缘具有 V 形分布。



1. 一种半导体光波导器件，其包括：

第一覆层；

第二覆层；以及

波导层，设置在所述第一和第二覆层之间并具有比所述第一和第二覆层基本上更高的折射率；

其中所述第一和第二覆层中的至少一个包括束控制层，在所述束控制层中半导体材料的折射率在层中作为深度的函数而变化，所述束控制层包括第一子层和第二子层，在所述第一子层中折射率逐渐从第一水平变化到第二水平，在所述第二子层中折射率逐渐从所述第二水平变化到第三水平；

其中所述第一和第二子层是相邻的，且所述第三水平基本等于所述第一水平；

其中所述第一子层提供逐渐增大的折射系数，所述第二子层提供逐渐减小的折射系数。

2. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述折射率以材料的组分比的函数变化。

3. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第一子层提供逐渐减小的导带边缘，所述第二子层提供逐渐增大的导带边缘。

4. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第一水平基本等于在相邻覆层中的折射系数的水平。

5. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第三水平基本等于在相邻覆层中的折射系数的水平。

6. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第一子层的折射系数在所述第一水平和所述第二水平之间以基本线性的方式变化。

7. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第二子层的折射系数在所述第二水平和所述第三水平之间以基本线性的方式变化。

8. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述第一和第二覆层由 GaAs 基或 InP 基系统形成。

9. 如权利要求 1 所述的器件，其中所述波导层为量子阱层。

10. 如权利要求 1 所述的器件，还包括衬底，所述第一覆层为最接近所

述衬底的层，所述束控制层提供在所述第一覆层之内。

11. 如权利要求 10 所述的器件，其中所述衬底包括 GaAs，所述第一覆层和束控制层包括 n 型 AlGaAs，且所述第二覆层包括 p 掺杂的 AlGaAs。

12. 如权利要求 1 所述的器件，包括脊波导。

13. 如权利要求 1 所述的器件，其中通过逐渐改变交替的不同折射率子层的厚度而在所述第一和第二束控制子层中逐渐改变所述折射率，每个所述交替子层具有基本小于光波长的厚度。

14. 如权利要求 9 所述的器件，属于激光器、光调制器和光放大器中的任何一种。

15. 一种形成半导体光波导器件的方法，包括如下步骤：

在衬底上形成第一覆层；

在所述第一覆层上形成波导层，所述波导层具有基本大于所述第一覆层的折射率；

在所述波导层上形成第二覆层，所述第二覆层具有基本小于所述波导层的折射率；以及

在形成所述第一覆层期间，通过逐渐改变淀积条件在其中形成束控制层，从而作为所述束控制层的深度的函数改变半导体材料的折射系数，使得所述束控制层包括第一子层和第二子层，在所述第一子层中折射系数逐渐从第一水平变化到第二水平，在所述第二子层中折射系数逐渐从所述第二水平变化到第三水平；

其中所述第一和第二子层是相邻的，且所述第三水平基本等于所述第一水平，且所述第一子层提供逐渐增大的折射系数，所述第二子层提供逐渐减小的折射系数。

半导体波导器件中输出光束发散的控制

技术领域

本发明涉及一种半导体波导器件，尤其涉及控制自其的光学输出光束发散的方法。

背景技术

在适于用在电信和印刷应用中的半导体激光器、放大器、调制器和其他波导的制造中，本发明具有虽然不是唯一的但却有特别的用途，其要求对其他光学组件（例如光波导）的耦合损耗低且无纽结（kink-free）功率输出高。更具体而言，本发明在电信应用的 980nm 泵浦激光器的制造中以及在印刷应用中的 830nm 高功率激光器的制造中有着虽然不是唯一但却是特别的用途。

常规的半导体激光器通常提供截面基本为椭圆形的输出光束。参考图 1，这种常规激光器一般包括形成于衬底 10 上的一系列层，包括下覆层 11、光学有源芯区 12 和上覆层 13。在常规的脊型激光器中，横向光学限制是通过脊波导 14 实现的，在脊波导 14 上可以淀积适当的电接触材料 15，用来提供电注入以驱动激光发射模式。获得的输出光束 16 如图所示沿着纵轴或 z 轴从输出端 17 出射。

芯区 12 一般包括多层，例如界定量子阱的中央层 12a，以及两个或更多外层 12b、12c，外层的组分以至层内深度的函数变化，以提供所谓的梯度折射率独立限制异质结构（GRINSCH）芯区 12。

图 1 的结构提供了如图 2 所示的导带边缘分布，其中，包覆区 20 对应于下覆层 11；包覆区 24 对应于上覆层 13；量子阱区 22 对应于中央层 12a；而梯度折射率区 21 和 23 分别对应于外层 12b、12c。

该结构的输出光束 16（图 1）通常在垂直方向（在图中被示为 y 轴）具有 30 和 40 度之间的量级的束发散，结果造成大的垂直远场。通常将垂直方向定义为晶片生长方向，即正交于衬底平面的方向，如图所示。相比之下，水平或横向方向（在图中被示为 x 轴）中的束发散通常在 5 和 10 度之间的量级上。

非常大的远场以及远场在垂直和水平方面中不对称导致了若干问题，例如，到激光器输出 17 下游的光学组件（例如光纤）的耦合损耗大，以及在激光器和单模光纤（其需要圆形的光束截面）之间的耦合容限特别低。

已经提出了若干种技术来减小垂直方向中的远场或者束发散，从而减小远场输出的非对称性。通过简单地减小芯区 12 的厚度能够将垂直远场减小到一定程度。不过，在这种情况下，还减小了与量子阱 12a 的光学交迭，这又增大了激光器阈值电流，并且由于和价带间吸收相关的损耗而发生腔损耗。此外，由于在高电流注入水平下发生高阶模的激射，更加难于实现高的无扭结发射功率。

已经提出了若干种方法以在半导体激光器结构中提供“模式修整”层来减小远场。

例如，US 5,815,521 描述了一种激光器件，其中在每个覆层中引入模式修整层。每个模式修整层包括相对于各覆层其余部分折射率增加的层，以形成 US'521 的图 1 所示的导带边缘分布。注意，模式修整层中每个均包括能带能级的局部阶跃变化。

US 5,923,689 描述了另一种技术，其中在量子阱结构的两侧提供折射率减小的一对无源波导，其经由势垒层与量子阱结构隔开。Shun-Tung Yen 等人在 Optical and Quantum Electronics 28 (1996) pp. 1229-1238 上的文章“Semiconductor lasers with unconventional cladding structures for small beam divergence and low threshold current”中也展示了一种类似结构，这种结构也和梯度折射率限制结构相关。这两篇文献都提倡一种覆层内的阶梯状折射率局部减小。

Guowen Yang 等人在 SPIE Vol. 2886(1996), pp. 258-263 上的文章“Design and fabrication of 980nm InGaAs/AlGaAs quantum well lasers with low beam divergence”描述了在覆层和梯度折射率层之间插入两个低折射率层以减小垂直方向的束发散。

Shun-Tung Yen 等人在 Proceedings of Semiconductor Laser Conference (1996), 15th IEEE International, pp.13-14 上的文章“980nm InGaAs/AlGaAs quantum well lasers with extremely low beam divergence”也描述了引入两个分别邻接梯度折射率层的低折射率层以减小垂直远场分布。

US 6,141,363 设想通过芯区内高低折射率交替的多层来减小束发散。

发明内容

本发明的目的在于提供一种具有垂直方向上减小的束发散的半导体波导器件。

根据一个方面，本发明提供了一种半导体光波导器件，其包括：

第一覆层；第二覆层；以及

波导层，设置在第一和第二覆层之间并具有比所述第一和第二覆层基本上更高的折射率；

其中第一和第二覆层中的至少一个包括束控制层，在束控制层中半导体材料的折射系数在层中作为深度的函数而变化，束控制层包括第一子层和第二子层，在第一子层中折射系数逐渐从第一水平变化到第二水平，在第二子层中折射系数逐渐从所述第二水平变化到第三水平。第一和第二子层是相邻的，且第三水平基本等于第一水平。

根据另一方面，本发明提供了一种形成半导体光波导器件的方法，其包括如下步骤：

在衬底上形成第一覆层；

在所述第一覆层上形成波导层，波导层具有基本大于第一覆层的折射率；

在所述波导层上形成第二覆层，第二覆层具有基本小于波导层的折射率；以及

在形成所述第一覆层期间，通过逐渐改变淀积条件在其中形成束控制层，从而作为束控制层的深度的函数改变半导体材料的折射系数，使得束控制层包括第一子层和第二子层，在第一子层中折射系数逐渐从第一水平变化到第二水平，在第二子层中折射系数逐渐从所述第二水平变化到第三水平。第一和第二子层是相邻的，且第三水平基本等于第一水平。

附图说明

现在将通过举例并参考附图的方式描述本发明的实施例，附图中：

图1示出了具有脊波导的常规半导体激光器件；

图2为图1的半导体器件的导带边缘的示意图；

图3示出了根据本发明的当前优选实施例的具有远场减小层的半导体激光器件；

图 4 为图 3 的器件的导带边缘的示意图;

图 5 为曲线图,以 y 位置为函数,示出了图 1 和 3 的激光器件的各光学输出的近场光强分布的比较;

图 6 为曲线图,以 y 位置为函数,示出了图 1 和 3 的激光器件的各光学输出的远场光强分布的比较;

图 7 为曲线图,示出了图 3 的激光器作为驱动电流的函数的基横模光强输出;

图 8 为曲线图,示出了图 3 的激光器作为驱动电流的函数的二阶横模光强输出;

图 9 为曲线图,示出了图 1 的激光器作为驱动电流的函数的基横模光强输出;

图 10 为曲线图,示出了图 1 的激光器作为驱动电流的函数的二阶横模光强输出;

图 11 为图 3 的器件的第一种构造中作为深度(y 方向)的函数的折射率分布的示意图;

图 12 为图 3 的器件的第二种构造中作为深度的函数的折射率分布的示意图;

图 13 为图 3 的器件的第三种构造中作为深度的函数的折射率分布的示意图;

图 14 为图 3 的器件的第四种构造中作为深度的函数的折射率分布的示意图;

图 15 为图 3 的器件的第五种构造中作为深度的函数的折射率分布的示意图;

图 16 为图 3 的器件的第六种构造中作为深度(y 方向)的函数的折射率分布的示意图;

图 17 为图 3 的器件的第七种构造中作为深度的函数的折射率分布的示意图;以及

图 18 为在图示用超晶格结构改变半导体材料折射率的原理中有用的示意图。

具体实施方式

参考图 3, 其示意性地示出了根据本发明的器件优选构造。衬底 30 支撑下覆层 31、光学有源芯区 32 和上覆层 33。在优选设置中, 脊波导 34 提供横向光学限制。可以向脊 34 上淀积适当的电接触材料 35, 用来提供电注入以驱动激励模式。

注意, 本发明的原理可以应用于具有其他提供横向光学限制的结构形式的结构二极管, 例如掩埋异质结激光器。还要指出, 本发明的原理还可以一般性地应用于除激光二极管之外的半导体波导结构。更一般地, 该原理可以应用于具有横向限制波导结构的有源和无源光器件中。这些器件包括放大器、调制器和无源波导, 诸如集成在单个衬底上以形成集成光学器件的那些。

如图所示, 所得的输出光束 36 沿着纵轴或 z 轴从输出端 37 射出。

芯区 32 优选包括多层, 例如界定量子阱的中央层 32a, 以及两个或更多外层 32b、32c, 外层的组分以层内深度的函数变化, 以提供梯度折射率独立限制异质结构 (GRINSCH) 芯区 32。不过, 应当理解, 本发明能够应用于未利用梯度折射率芯区的激光器件。

下覆层 31 结合了远场减小层 (“FRL”) 或束控制层 38。为此, 下覆层包括两个子层 31a、31b, 其间形成束控制层 38。束控制层 38 包括至少两个子层 38a、38b, 均由半导体材料形成, 其性质沿着其厚度以下文将要更详细描述的方式逐渐变化。

图 3 的结构提供了如图 4 所示的导带边缘分布。下包覆区 40 到 43 对应于下覆层 31。更具体地, 区域 40 对应于下覆子层 31a; 区域 43 对应于下覆子层 31b; 区域 41 对应于下束控制子层 38a; 而区域 42 对应于上束控制子层 38b。包覆区 47 对应于上覆层 33; 量子阱区 45 对应于中央层 32a; 而梯度折射率区 44 和 46 分别对应于外层 32b、32c。

在 830nm 激光器的特别优选实施例中, 该激光器件的层结构如下给出:

层号	图 3 和 4 中的 标号	材料 (x, y)	组分	厚度 (μm)	类型	掺杂剂
15	39	GaAs		0.100	p	Zn
14	33, 47	Al(x)GaAs	0.35>0.05	0.120	p	Zn
13	33, 47	Al(x)GaAs	0.35	1.700	p	Zn
12	33, 47	Al(x)GaAs	0.35	0.200	p	Zn
11	32b, 46	Al(x)GaAs	0.22>0.35	0.120		U/D
10	32a, 45	(Al _x Ga) _{1-y} In(y)As	x=0.04,y=0.14	0.008		U/D
9	32b, 44	Al(x)GaAs	0.30>0.22	0.070		U/D
8	32b, 44	Al(x)GaAs	0.33>0.30	0.030	n	Si
7	32b, 44	Al(x)GaAs	0.35>0.33	0.020	n	Si
6	31b, 43	Al(x)GaAs	0.35	0.625	n	Si
5	38b, 42	Al(x)GaAs	0.27>0.35	0.320	n	Si
4	38a, 41	Al(x)GaAs	0.35>0.27	0.320	n	Si
3	31a, 40	Al(x)GaAs	0.35	1.400	n	Si
2	31a	Al(x)GaAs	0.05>0.35	0.210	n	Si
1	30	GaAs		0.500	n	Si

在上表的第 2 栏中引用了图 3 和图 4 的各层。

利用 MOCVD 或 MBE 淀积技术, 在 GaAs 衬底 (第一层) 上生长该结构, 其具有 8nm 厚的 InGaAlAs 压应变量子阱 (第十层), 用于 830nm 激光应用。量子阱 32a、45 在两侧由 120nm 的梯度折射率独立限制异质结构层 32b、32c、44、46 (第七到第九层和第十一层) 包围。第三和第六层为下覆子层 31a、31b, 第十二和第十三层为上覆子层 33、47。第四和第五层为用于远场减小的束控制子层。这些层还被用于抑制高阶模激射并因此提高无结功率。

在该实施例中, 对第四、第五和第六层的厚度以及第四和第五层中点的 Al 摩尔分数加以优化, 使得满足以下标准:

- i) 垂直远场的半最大值全宽 (FWHM) 约为 21 度;

- ii) 因束控制层所致的光学交迭减小非常不显著;
- iii) 在晶片生长容限为 $\pm 10\%$ 层厚和 $\pm 1\%$ 摩尔分数时可获得极佳的器件性能;
- iv) 显著抑制高阶模激射。

可以使用常规光刻技术和干法或湿法蚀刻, 随后进行晶片减薄和金属接触的淀积, 进行器件制造。

图 5 和 6 示出了在有和没有束控制层 38a、38b、41、42 的情况下, 2.5mm 宽的脊激光器的基模以 y 位置的函数的仿真近场强度分布和远场分布。

在图 5 中, 虚线代表没有束控制层的近场强度分布, 实线代表有束控制层的近场强度分布。可以看出, 束控制层对近场强度分布几乎没有影响。不过, 在图 6 中, 虚线代表没有束控制层的远场强度分布, 实线代表有束控制层的远场强度分布。可以看出, 束控制层对强度分布有实质性影响, 提供了窄得多的峰和显著更大的强度最大值。

激光器件的脊 34 的蚀刻在器件的无扭结功率和输出光束的椭圆度方面起到重要作用, 因为高阶模激射和水平远场强烈依赖于蚀刻步骤。

可以在利用有和没有束控制层的结构处理的器件之间做出比较。为了使比较更有意义, 使用了对于同样水平远场的标准。在这种情况下, 在具有模式控制的结构上处理的器件需要被蚀刻至 50nm 深度, 这比没有模式控制层而处理的器件大。针对具有 2.2mm 宽的脊和 1.2mm 长的腔的器件示出了比较。

图 7 示出了在具有束控制层 38a、38b 的器件中基(第一阶)模作为驱动电流的函数的激光功率。图 9 示出了在对应的没有束控制层的器件中基模的作为驱动电流的函数的激光功率。可以看出基本没有区别。

不过, 图 8 示出了在具有束控制层 38a、38b 的器件中高阶(第二阶)模的作为驱动电流的函数的激光功率。图 10 示出了在对应的没有束控制层的器件中高阶模的作为驱动电流的函数的激光功率。可以看出, 就高阶模激射而言器件性能有着巨大差别。更具体地, 对于具有束控制层的器件结构而言, 直到注入电流大到 600mA 都没有观察到功率扭结(power kink), 而在没有束控制层的器件结构的情形, 在注入电流仅仅达到 175mA 时就发生了功率扭结。

现有技术通常提出覆层的折射率包括阶跃不连续性的模式控制层。在本

发明中发现,使用梯度束控制层,尤其是使用V分布束控制层,显著地改善了器件性能。另一项优点在于,利用本发明的梯度束控制层,为了实现期望的模式控制所需要的生长条件控制要宽松得多。

在下表中可以证明这一点,对于无束控制层和有束控制层的器件,其示出了垂直远场和光学交迭作为Al摩尔分数变化1%的函数的变化情况。在本发明中对垂直远场和光学交迭变化的控制都紧密得多。

有模式控制层			无模式控制层		
Al 摩尔分数	垂直远场 (°)	光学交迭 (%)	Al 摩尔分数	垂直远场 (°)	光学交迭 (%)
26%	19.4	1.86	30%	17.3	1.58
27%	21.4	2.26	31%	21.4	2.36
28%	23.6	2.38	32%	25.7	2.46

V分布束控制层的另一个优点在于,它能够消除因束控制层中载流子捕获而可能产生的问题,从而获得更好的载流子输运和改善的L-I(光强与驱动电流)斜率效率。

上述实施例展示了束控制层38的使用,其中第一(下)覆层31整合了两个束控制子层38a、38b,其中半导体材料的物理性质(化学计量比)作为深度(y)的函数而变化,从而改变各子层的电子性质(导带边缘)和光学性质(折射率)。

更具体地,束控制子层38a、38b的物理性质有所变化,以便在束控制层38中提供导带边缘41、42基本线性的减小,然后增加,以提供基本“V”形的分布。不过,应当理解,该分布可以有变化。

束控制层可能的折射率与深度之间的关系的非穷举的选择在图11到17中示出。在图11中,折射率分布基本对应于图4所示的导带边缘分布,包括:(i)低折射率下包覆区110;(ii)下束控制子层区111,其具有为y的函数的线性增加折射率;(iii)下束控制子层区112,具有为y的函数的线性减小的折射率;低折射率下包覆区113;梯度折射率限制区114和116;量子阱区115;以及上包覆区117。

更一般地,束控制层包括第一子层38a和第二子层38b,在第一子层38a

中,物理性质从第一水平逐渐变化到第二水平,在第二子层 38b 中,物理性质从第二水平逐渐变化到第三水平,例如,如图 11 到 17 的折射率分布所示。

第三水平可以与第一水平相同,使得下覆子层 31a 和 31b 具有基本相同的物理性质,如图 11 到 15 和 17 所示。或者,包覆区的一部分(例如,110)可以具有与包覆区的其他部分(例如,113)不同的折射率值。更具体地,包覆区的下(或最外)部分(例如,110)可以具有比包覆区的其他部分(例如,113)更低的折射率值,如图 16 所示。

物理性质可以以非线性方式变化,以在第一和第二子层中提供作为深度的函数的导带边缘和/或折射率的非线性变化。这种设置在图 13 中示出,其中束控制层的第一子层 131 具有逐渐增大的折射率,其中增大是非线性的。类似地,束控制层的第二子层 132 具有逐渐减小的折射率,其中减小是非线性的。

束控制子层 38a 和 38b 可以相邻,即,之间没有其他子层,如图 11 和 13 到 17 所示。不过,在另一个实施例中,束控制子层 38a、38b 可以被另一子层隔开,例如,以提供导带边缘的底部平坦 V 形分布,或者折射率的顶部平坦的倒 V 形分布,如图 12 所示。在图 12 中,束控制层提供了折射率逐渐增大的下束控制子层 121、折射率逐渐减小的上束控制子层 123,以及折射率基本恒定的中间束控制子层 122。

束控制层 38 可以提供于下覆层 31 之内、上覆层 33 之内,或者束控制层可以提供于上下覆层二者之内。后一例由图 14 的折射率分布示出。图 14 示出了下覆层 140、143 之内的包括子层 141、142 的第一束控制层以及上覆层 144、147 之内的包括子层 145、146 的第二束控制层。

束控制层可以位于紧邻量子阱结构或 GRINSCH 结构的覆层中,如图 17 所示。在图 17 中,束控制子层区 171、172 位于下包覆区 170 和 GRINSCH 区 173 之间。

如上所述,横向光学限制结构,例如量子阱区 115 不需要夹在梯度折射率限制区 114、116 之间(例如图 11)。如图 15 所示,量子阱区 115 可以夹在阶跃折射率限制区 154、156 之间。

束控制层能够普遍地布置在 p-覆层或 n-覆层中,尽管 n-覆层是优选的,因为它不影响任何包覆蚀刻工艺。

本发明的重要方面在于在覆层中使用性质逐渐变化的束控制层,而不是使用单个的大阶跃变化。渐变在束控制层中发生在至少 50nm 的厚度中。更

优选地，性质的渐变在第一方向发生在至少 100nm 厚的束控制子层上，然后在与第一方向相反的第二方向发生在至少 100nm 厚的束控制子层上。

注意，该“渐变”是相对于从其通过的光的光学波长而有效地定义的。还有可能通过构建超晶格型结构或数字合金来在半导体层中建立这种折射率的渐变，在数字合金中，以局部的平均厚度比形成交替的低折射率材料层和高折射率材料层，这在一个光波长或更小量级的尺度上定义有效折射率。这种原理在图 18 中示出。

于是，在低折射率材料子层 182 和高折射率材料子层 181 之间的一系列阶跃变化 180 能够通过缓慢改变低折射率子层和高折射率子层的厚度比而获得折射率的渐变，如子层 183、184 所示，在低折射率子层 182 和高折射率子层 181 中，每个子层都具有基本小于光波长的厚度。实际效果是在层内传播的光看到折射率 185 的相应的渐变。

还要理解的是，渐变通常能够由材料性质（例如折射率）的小的阶梯状增大或减小的“楼梯”型系列形成束控制层来实现，每个相连的台阶厚度基本小于在层中传播的光波长。

在当前优选的实施例中，折射率的渐变在至少 100nm 的厚度上获得了束控制子层至少 0.1% 的折射率变化。

在优选实施例中，在期望的折射率变化范围内，带隙分布和半导体材料组分的相应变化以基本线性的方式与其相关。

本发明在很宽范围的半导体材料中有实用性，尤其是下表所列的那些，虽然不是唯一的。

量子阱材料	势垒材料	包覆材料	衬底
InGaAs	AlGaAs	AlGaAs	GaAs
GaAs	AlGaAs	AlGaAs	GaAs
InGaAlAs	AlGaAs	AlGaAs	GaAs
InGaAs	InGaP	InGaAlP	GaAs
InGaAs	GaAs	InGaP	GaAs
InGaAs	InGaAsP	InGaP	GaAs
InGaAsN	AlGaAs	AlGaAs	GaAs
InGaAsP	InGaAsP	InP	InP
InGaAlAs	InGaAlAs	InP	InP

有意将其他实施例包含在所附权利要求的范围中。

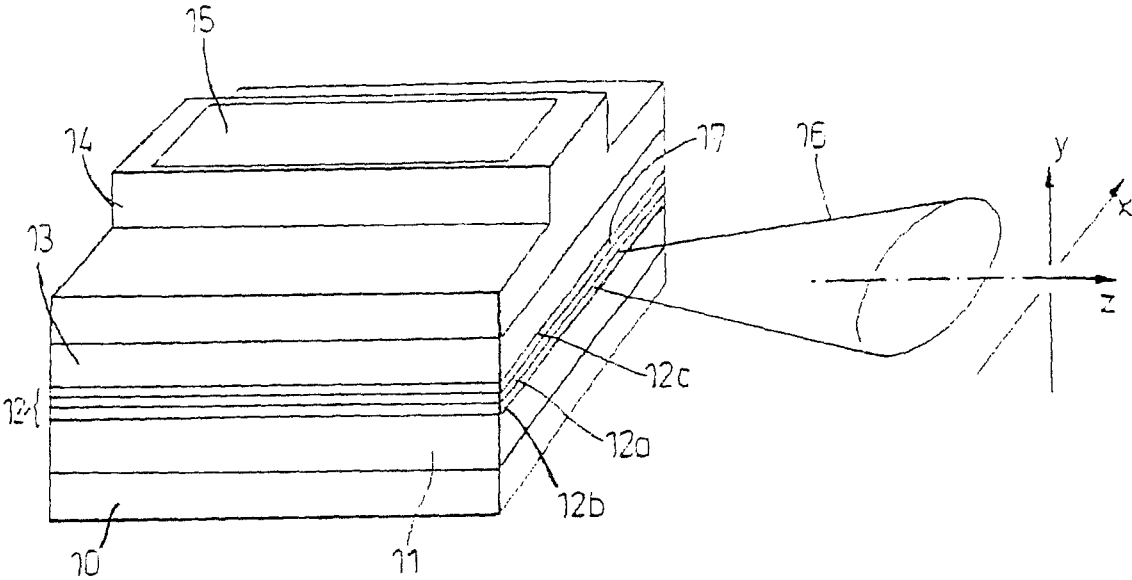


图 1

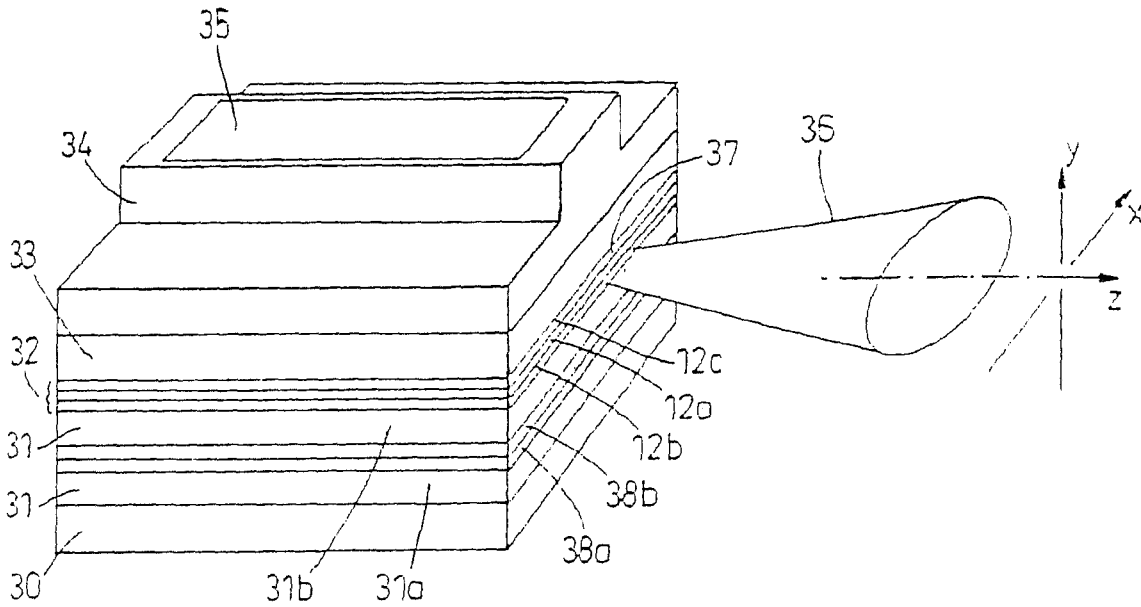


图 3

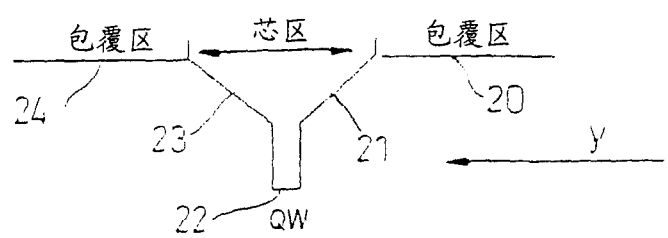


图 2

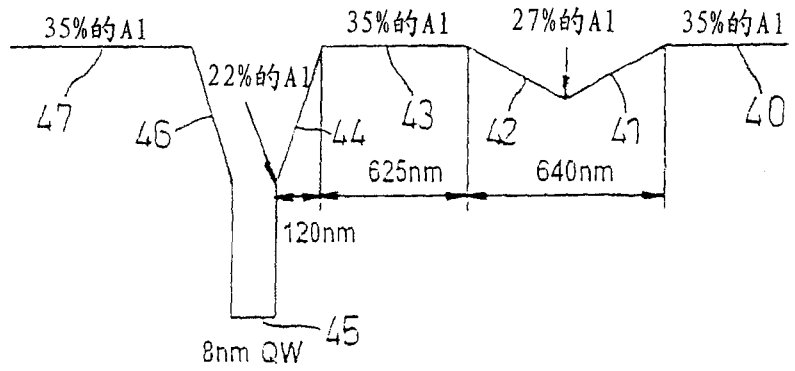


图 4

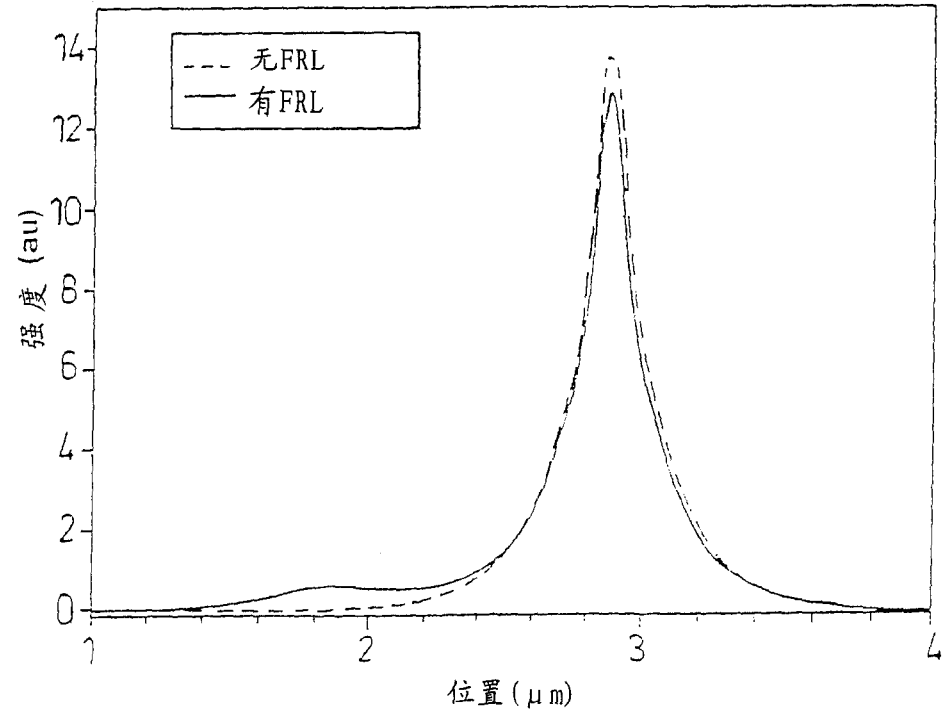


图 5

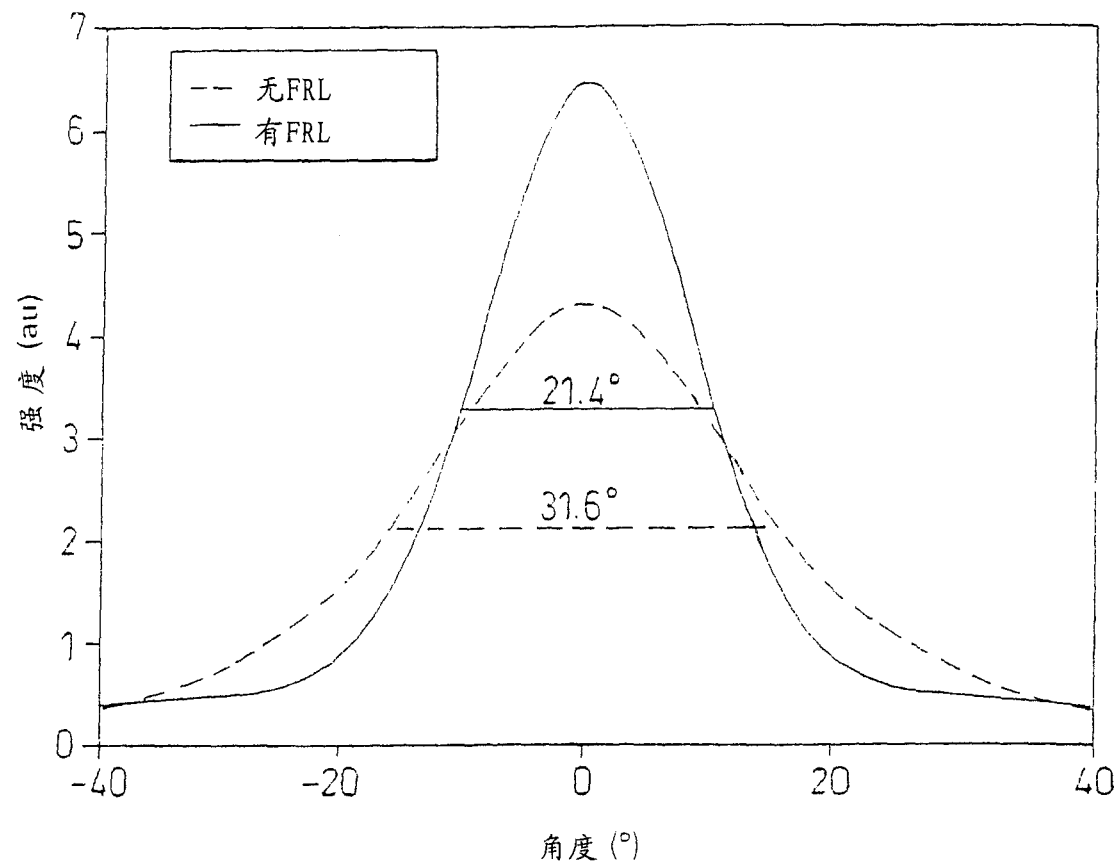


图 6

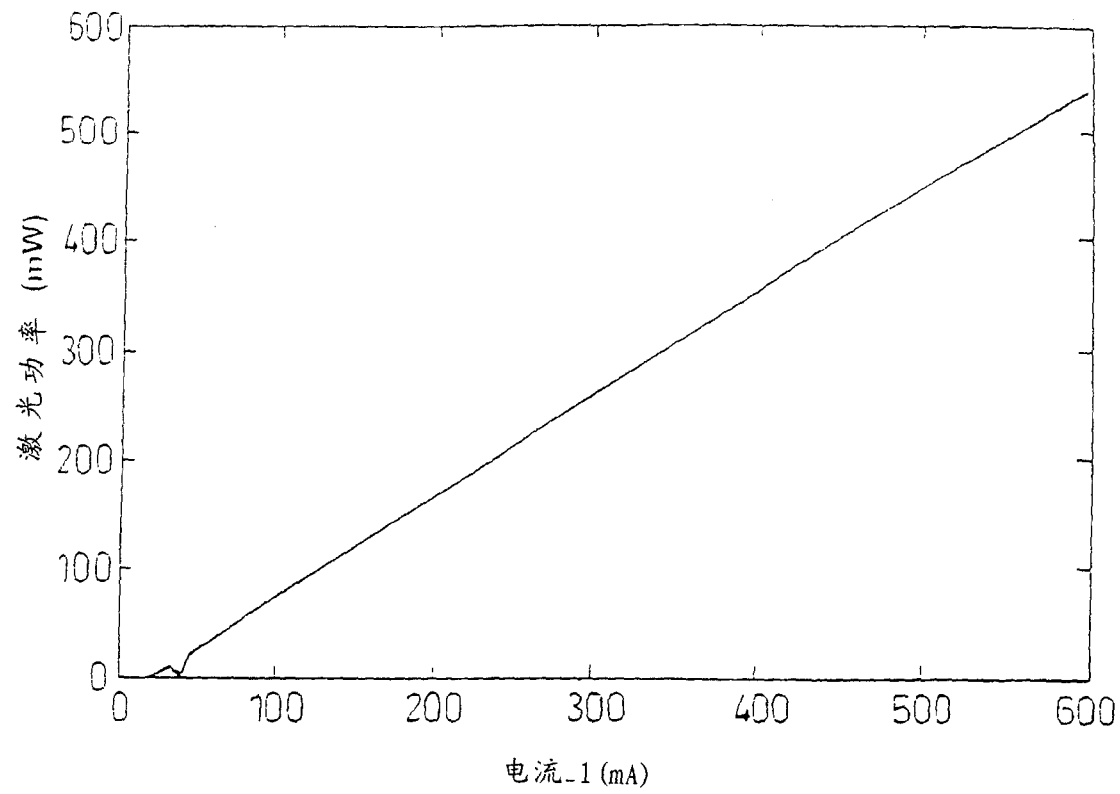


图 7

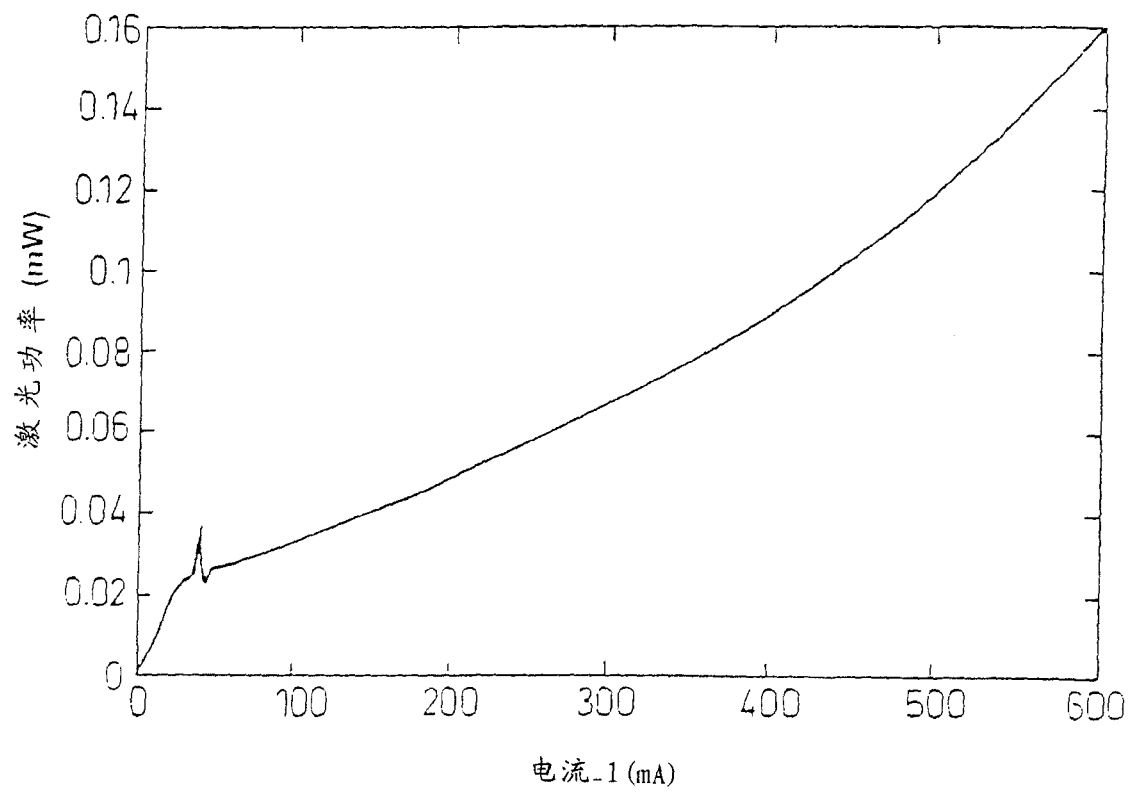


图 8

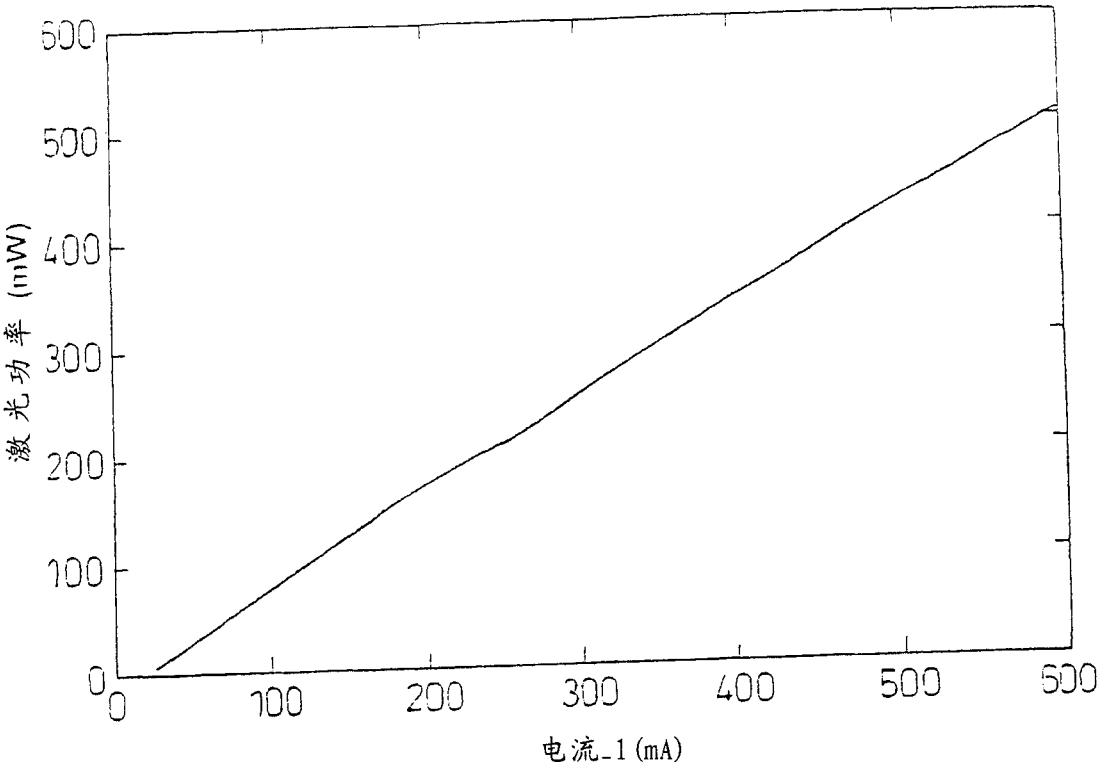


图 9

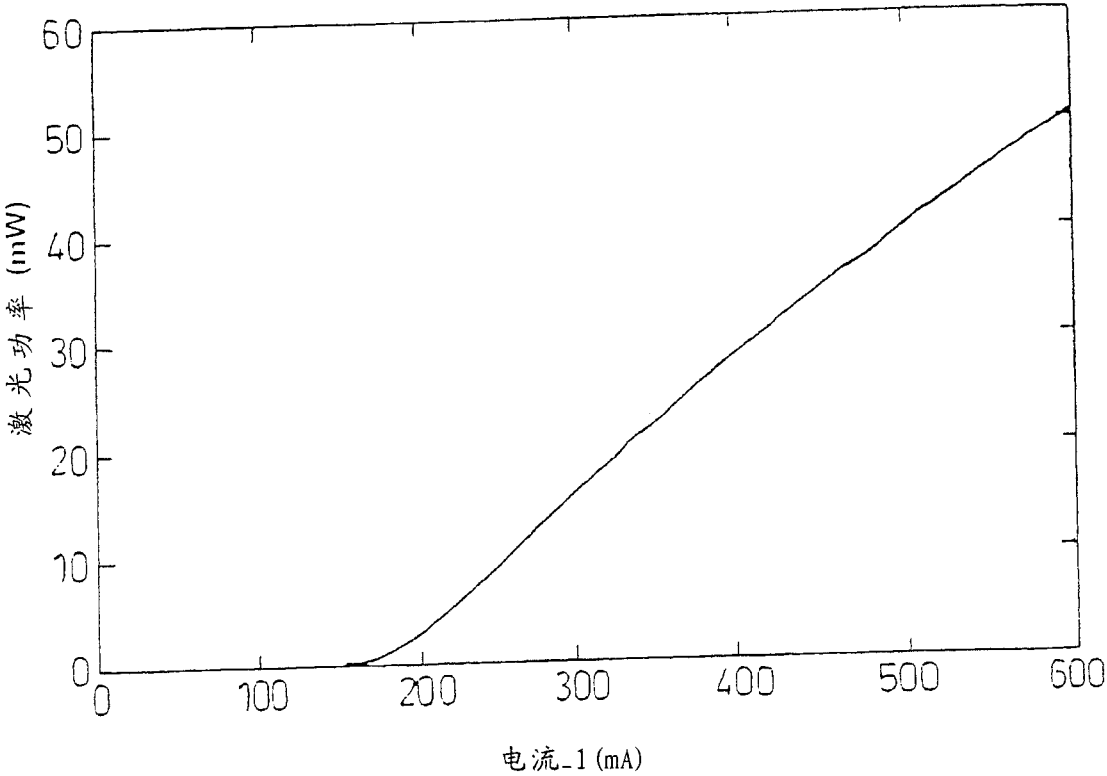


图 10

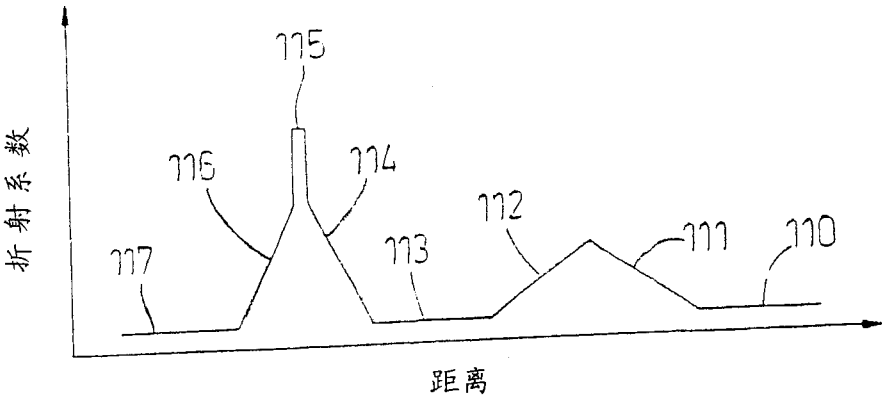


图 11

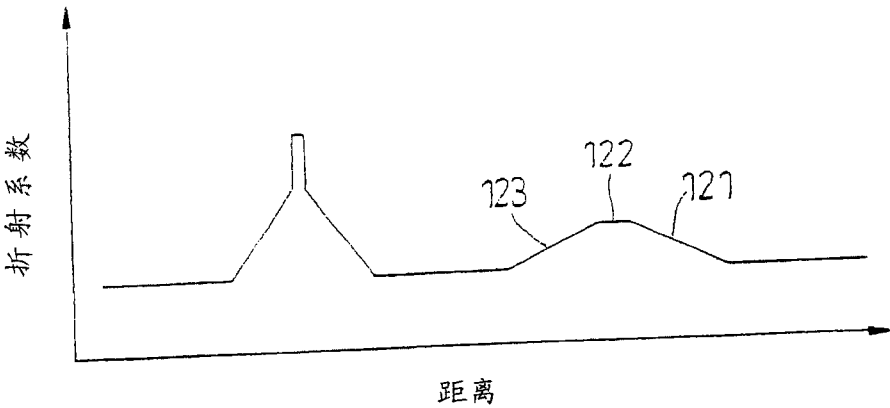


图 12

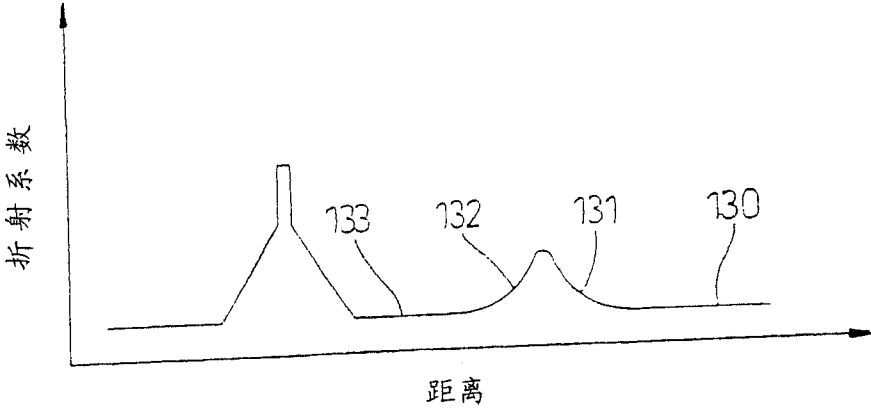


图 13

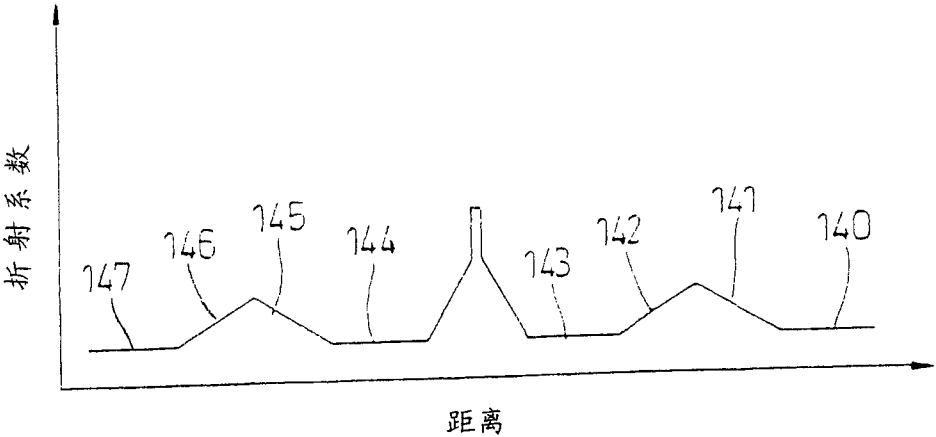


图 14

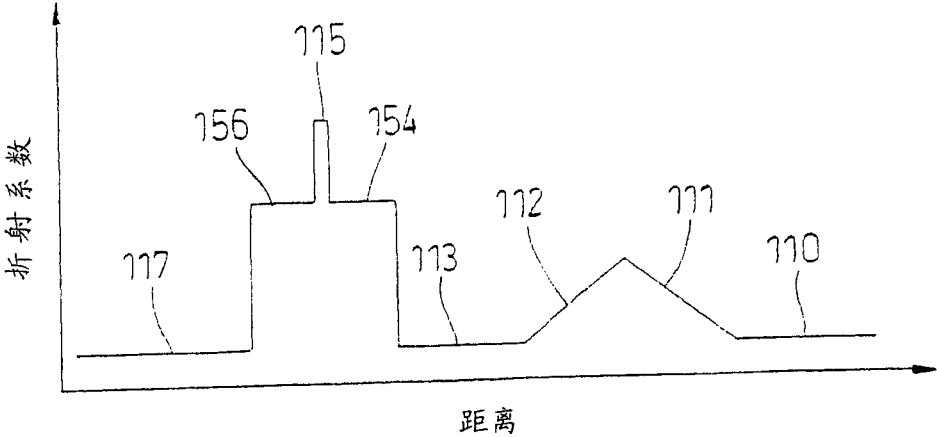


图 15

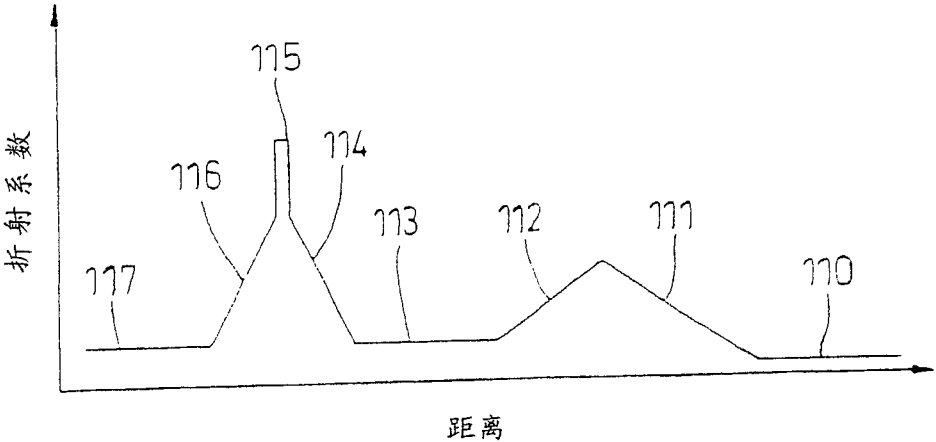


图 16

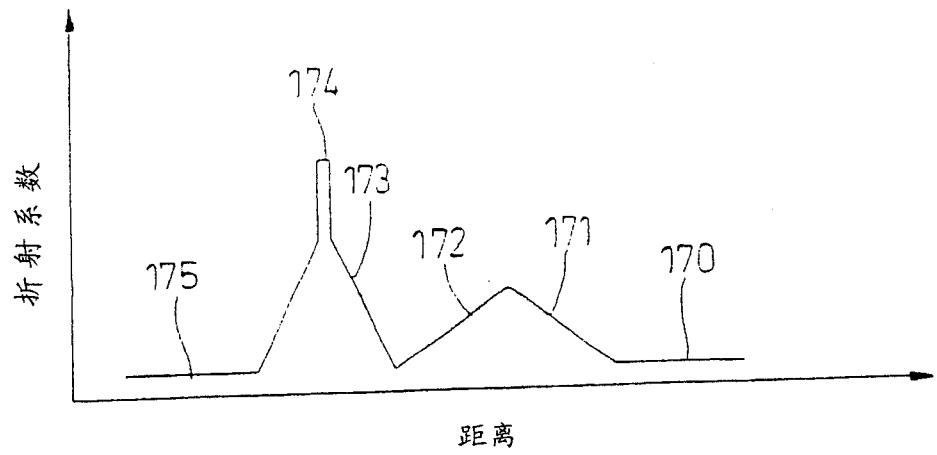


图 17

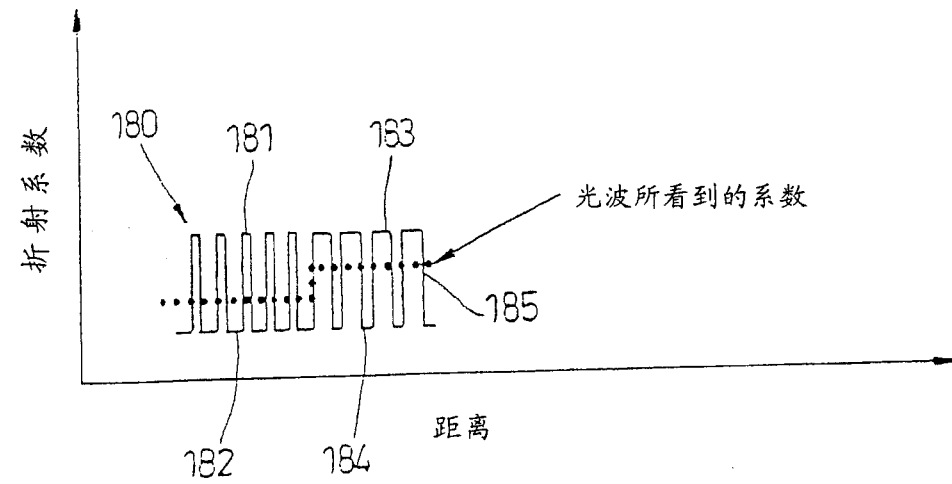


图 18