



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101194402 B

(45) 授权公告日 2011.04.20

(21) 申请号 200680007265.8

(22) 申请日 2006.01.24

(30) 优先权数据

60/647,078 2005.01.24 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2007.09.06

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2006/002609 2006.01.24

(87) PCT申请的公布数据

W02006/079100 EN 2006.07.27

(73) 专利权人 索尔实验室公司

地址 美国新泽西州

(72) 发明人 A·E·卡布尔 J·M·拉松

L·G·桑斯特伦 B·克勒曼

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

代理人 王岳 张志醒

(51) Int. Cl.

H01S 3/10(2006.01)

(56) 对比文件

DE 19909497 C1, 2001.01.11, 全文.

US 20040264515 A1, 2004.12.30, 全文.

CN 1547790 A, 2004.11.17, 全文.

吕福云等. 窄线宽可调谐半导体激光器. 南开大学学报 32 2. 1999, 32(2), 79-81.

金杰等. 窄线宽可调谐外腔半导体激光器的研究. 河北工业大学学报 29

1. 2000, 29(1), 87-90.

金杰等. 外腔半导体激光器的实验研究. 南开大学学报 35 4. 2002, 35(4), 56-59.

董新永等. 电流调谐光纤光栅外腔分布布拉格反射激光器. 光学学报 21

12. 2001, 21(12), 1513-1515.

审查员 任晓东

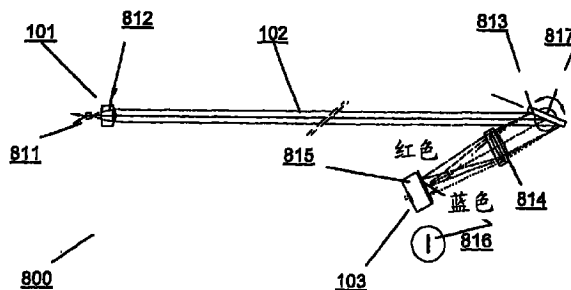
权利要求书 2 页 说明书 18 页 附图 6 页

(54) 发明名称

具有快速波长扫描的紧凑多模激光器

(57) 摘要

根据本发明,提供了一种具有接近连续的波长扫描的紧凑激光器。在一些实施例中,可以在宽范围上扫描该紧凑激光器系统。在一些实施例中,可以以高扫描速率扫描该紧凑激光器系统。在一些实施例中,该紧凑激光器系统可以具有可变相干长度。具体而言,能够实现具有超过 140nm 的波长扫描的实施例,其连续可变扫描速率高达 1nm/s 左右,扫描速率的不连续增大高达 10nm/s 左右,且可变相干长度从 1mm 到大约 30mm。



1. 一种可调谐多模激光光源，包括：
形成于两个反射器之间的光学腔，所述光学腔支持多个光学模式；
位于所述光学腔中的光学增益介质；以及
位于所述光学腔中的调谐部分，耦合所述调谐部分以从所述增益介质接收光并在所述多个光学模式的模式之间调谐，
其中形成相干长度大于大约 2mm 的外腔波长调谐的多模激光器。
2. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述调谐部分能够在大于所述光学增益介质的中心波长的大约 5% 的调谐范围上调谐，并能够以大约 20Hz 和大约 50kHz 之间的波长扫描频率进行扫描。
3. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述可调谐多模激光光源具有大于大约 0.5mW 的输出功率。
4. 如权利要求 1 所述的光源，其中在所述光学腔的滤波函数下的所述多个模式的平均取决于由所述调谐部分调谐的波长范围。
5. 如权利要求 1 所述的光源，其中在所述调谐部分的调谐范围上所述光学腔的长度基本恒定。
6. 如权利要求 5 所述的光源，其中所述调谐部分保持所述光学腔的长度基本恒定。
7. 如权利要求 1 所述的光源，其中调节所述光学腔的一部分的长度以补偿由所述调谐部分引入的长度变化。
8. 如权利要求 1 所述的光源，还包括位于所述光学增益介质和所述调谐部分之间的所述光学腔中的光传播介质。
9. 如权利要求 8 所述的光源，其中所述光传播介质为自由空间。
10. 如权利要求 8 所述的光源，其中所述光传播介质为光学透射的液体、气体或固体。
11. 如权利要求 8 所述的光源，其中所述光传播介质为光纤。
12. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述光学增益介质为半导体增益元件。
13. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述调谐部分包括：
安装于光扫描器上的色散性元件，所述色散性元件从所述增益介质接收光；
透镜系统，耦合所述透镜系统以从所述色散性元件接收光；以及
光学耦合到所述透镜系统的狭缝镜片，所述狭缝镜片位于所述透镜系统的焦平面上。
14. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述调谐部分是快速机械波长调谐部分且包括色散部分，光谱滤光部分和反射器部分。
15. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述调谐部分是快速机械波长调谐部分且包括光谱滤光部分和既有色散性又有反射性的部分。
16. 如权利要求 14 所述的光源，其中所述反射器部分充当所述光学腔的第二末端反射器。
17. 如权利要求 14 所述的光源，其中所述反射器部分与所述光谱滤光部分组合到一起。
18. 如权利要求 1 所述的光源，其中所述调谐部分是快速机械波长调谐部分且包括如

此布置的色散部分、光谱滤光部分、光学成象部分和反射器部分，使得光学成象部分和反射器部分配置成光学猫眼结构，所述光谱滤光部分在所述反射器部分的前面，并且所述光学成象部分在所述光谱滤光部分和所述色散部分之间。

具有快速波长扫描的紧凑多模激光器

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求由 Alex Cable、Michael Larsson、Lars Sandström 和 Bengt Kleman 于 2005 年 1 月 24 日提交的美国临时申请 60/647,078, “Compact Laser with Continuous Wavelength Scanning” 的优先权, 在此将其全文引入以做参考。

技术领域

[0003] 本发明涉及可调谐多模激光器, 具体而言涉及具有跳模波长扫描的紧凑激光器。

背景技术

[0004] 目前外腔激光器 (ECL) 广泛用于需要连续可调激光源的一些应用中。虽然有许多覆盖市场上大范围设计的 ECL 商业制造商, 仍然有很多应用将受益于调谐速度的显著提高, 目前的设计还不能提供这种调谐速度的提高, 即使这种提高使以牺牲系统的其他工作参数 (例如动态相干长度和功率稳定性) 为代价的也是如此。

[0005] 更具体而言, 调谐速度大于 1000000nm/s , 调谐范围至少为中心波长的 5%, 且相干长度至少为几个毫米的快速 ECL 目前仍不能商用。缺少波长调谐速度是现有 ECL 的主要缺点, 因为有很多应用会受益于调谐速度的显著提高。当前的 ECL, 例如可以具有足够大的调谐范围以及真正的单模行为, 因此具有显著超过几个毫米的相干长度 (常常为很多米), 但是它们的调谐速度限于不大于大约 1000nm/s 。

[0006] 注意, 有提供快速、高精度度波长切换的可调谐激光器。例如, 瑞典 Kista 的 Syntune 提供一种这样的可切换激光器, 其能够实现小于 50ns 的点到点波长切换时间。不过, 这种系统不提供对它们的输出波长的连续扫描。相反, 它们分立地从一个波长移动到另一个, 在从一个稳定波长移动到另一个所需的时间间隔中不用产生明确的波长。此外, Syntune 激光器需要重要的制造基础设施, 不容易在新波长处实施。另一种具有一些所希望的特性的产品是 Micron Optics 提供的。在 Optics Express, 2003 年 9 月 8 日第 11 卷第 18 期 2183 页到 2189 页的科学论文中提到了 Micron Optics 系统。Micron Optics 光源提供 2mW 的光强度, 3.5ms 的扫描时间, 1308nm 的中心波长, 87nm 的 FWHM (半最大值全宽) 扫描带宽。假设总的扫描范围 (定义为 99% 的功率点) 大约为 87nm 的 FWHM 扫描带宽的两倍, Micron Optics 系统获得了大约 50000nm/s 的扫描速度。不过, Micron Optics 系统利用了腔下光纤元件, 易于受到不希望的偏振变化影响, 并且受到调谐速度比高速应用所需的低得多的影响。此外, Micron Optics 系统是一种基于光纤的激光器, 因此难以使腔充分短以实现非常高的调谐速率。可调谐激光器的长度决定着光子或光子群的渡越时间。如果特定波长的一群光子在渡越激光器时花费了太长时间, 当它们返回到滤波器元件时, 滤波器元件可能被调谐到了另一个波长, 因此会提供不希望的激光作用的衰减。R. Huber 等人在 2005 年 5 月 2 日 Optics Express 第 13 卷第 9 期第 3513 页到 3528 页的文章中提供了对这种局限的更完整描述。

[0007] ECL 的典型设计方案是提供可绕枢轴旋转的镜片或光栅，可以旋转镜片或光栅以在激光器的整个调谐范围上使激光器保持在相同的纵模。这样选择枢轴，使得如下所示的方程 1 和方程 2 同时得到满足：

$$[0008] \quad \lambda_N = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

$$[0009] \quad N \lambda_N = 2L \quad (2)$$

[0010] 在方程 1 和 2 中， λ_N 为激光器的平均瞬时输出波长， N 为激光器的纵模数， d 为与波长以相同单位测得的光栅常数， α 为光场在光栅上的入射角， β 为光场离开光栅时的衍射角， L 为激光腔的光程长度。如果在 N 固定的时候调谐波长期间，方程 1 和 2 的两个条件同时满足，所得的激光器将可以连续调谐而不会有任何纵模跳越。尽管有一些机械方案可以满足上述两个方程的要求，由于它们大小的原因，那些可商业购买或在科学文献中找到的机械方案受限于调谐速度远低于希望的调谐速度。在 N 固定的情况下根据以上方程 2 旋转镜片或光栅所需的机械通常是复杂的机构，惯性质量大，使得它们不能以快速调谐所需的高速被致动。

[0011] 就我们所知，市场上可买到的最快的连续扫描单纵模可调谐激光器是 New Focus 提供的，广告说可提供 1000nm/s 的扫描速度。为了达到所希望的 1000000nm/s 的扫描速度，运动光学元件（通常为镜片或光栅）最好绕其质心旋转且最好越小越好。使用谐振扫描器提供了实现这两个目的的方便方式；不过这种方法通常具有以运动光学元件为中心的旋转轴，且当 N 保持不变时通常不能满足方程 2。换言之，不能连续满足纵模条件 $N \lambda_N = 2L$ ，当调谐范围达到要达到希望的范围时，激光辐射会从一个纵模跳到另一个。

[0012] 模式跳变可以是一个或几个模式距离宽，模式距离为：

$$[0013] \quad \Delta \lambda = \lambda^2 / 2L$$

[0014] 出现了这些模式跳变，激光器将不再是连续可调谐激光器，激光器的动态相干长度将变成不稳定的且劣化到系统静态相干长度之下。为了减小模式跳变的大小，可以增加腔长，不过这也将使激光器更易于表现出多模行为，从而也导致了短相干长度。

[0015] 在美国专利 No.5,956,355（即专利' 355）中，披露了一种激光器设计，其中，调节宽范围可调谐单模激光器的腔长以补偿波长的变化。专利' 355 披露，可以通过适当选择激光腔组件和几何尺寸使激光器提供几乎连续的频率调谐，同时还提供高的扫描速率。专利' 355 中提出的方法使用如此取向的可操纵的镜片和衍射光栅（提供波长选择性），使得可操纵镜片以如下方式跨光栅扫描光场，从而使腔长变化以抵销波长的变化，目的是在 N 保持不变的前提下，保持以上方程 2 中的近似平衡。在专利' 355 中还提出，可以添加额外的元件，使得可以解决方程 2 中残余的误差或不平衡，从而可以在宽调谐范围上保持方程 2 的精确平衡。虽然看起来这种方法是可行的，但据我们所知，所提的这种设计还没有成功的实现。

[0016] 可以使用几种方法之一测量波长扫描激光器的瞬时相干长度，通常这些方法涉及到各种不同的干涉仪。一种这样的方法是使用基于光纤的 Michelson 干涉仪。相干长度 L_c 由下式给出：

$$[0017] \quad L_c = 2 \times \text{HWHM}$$

[0018] 其中 HWHM 为将干涉图从最大值的 100% 改变成最大值的 50% 所需的干涉仪中的镜片之一的位移。注意，因子 2 表示在 Michelson 干涉仪的运动臂中的两次通过（正向

和反向)。

[0019] 在很多应用中都需要同时实现高的近似连续的调谐速度和至少几个毫米的动态相干长度。在扫描光源光学相干层析成像(Swept Source Optical Coherence Tomography, SS-OCT)中是这样, 在一些光学远程光纤感测和光学元件测试应用中也是这样。在 SS-OCT 中, 光源的相干长度设定了成像深度的极限, 潜在的成像深度随着相干长度线性地缩放。

发明内容

[0020] 根据本发明, 提供了一种近似连续波长扫描的多模激光器, 其具有大的扫描速率, 同时保持了足够的相干长度, 从而可用于扫描光源应用中。在本发明的一些实施例中, 紧凑激光源可以具有超过大约 140nm 的波长扫描范围, 可变扫描频率高达大约 10nm/ μ s, 相干长度在大约 3mm 到大约 30mm 之间。

[0021] 在如上所述的其他系统中, 试图在扫描激光器的波长的时候保持单纵模或接近单纵模, 与此相反, 本发明的一些实施例提供了一种人为多模的激光器设计。此外, 根据本发明的一些实施例的调谐机构是这样的, 使得在激光器调谐波长的时候, 纵腔模集合显著变化, 有时可以是许多万个模式。

[0022] 根据本发明的一些实施例的紧凑激光系统包括光学腔、光发生和光学增益介质部分以及束整形光学系统; 光传播介质; 以及快速机械波长调谐部分, 其位置适于从光发生部分和光传播介质接收光, 所述快速机械波长调谐部分包括色散部分和光发生部分, 所述色散部分将选定波长的光反射回光传播介质, 其中可以扫描所述激光系统的波长。在一些实施例中, 所述光学腔的第一末端反射器由光发生和光学增益介质的一端制成。在一些实施例中, 所述光学腔的第二末端反射器嵌入到所述快速机械波长调谐部分中。在一些实施例中, 所述光学腔的第二末端反射器为分离光学元件。在一些实施例中, 快速机械波长调谐部分包括色散部分, 光谱滤光部分和反射器部分。在一些实施例中, 所述反射器部分为所述色散部分。在一些实施例中, 所述反射器部分充当所述激光系统腔的第二末端反射器。在一些实施例中, 所述反射器部分与所述光谱滤光部分组合到一起。在一些实施例中, 腔的总光程长度短到 25mm。在一些实施例中, 腔的总光程长度可以从 25mm 变化到许多米。

[0023] 以下参考附图更全面地讨论这些和其他实施例。

附图说明

[0024] 图 1 示出了根据本发明的激光系统的实施例。

[0025] 图 2 示出了根据本发明的激光系统的另一实施例。

[0026] 图 3 示出了根据本发明的激光系统的另一实施例。

[0027] 图 4 示出了根据本发明的激光系统的另一实施例。

[0028] 图 5 示出了根据本发明的激光系统的另一实施例。

[0029] 图 6 示出了根据本发明的激光系统的一些实施例的相干长度与扫描速度的关系。

[0030] 图 7 示出了根据本发明的激光系统的另一实施例。

[0031] 图 8 示出了根据本发明的光源的略图。

[0032] 图 9 示出了诸如图 8 所示的光源的腔的滤波器功能。

[0033] 图 10 示出了作为驱动电流的函数的、诸如图 8 所示的光源实施例的输出功率。

[0034] 图 11 为诸如图 8 所示的光源实施例的增益元件的 ASE 光谱的 OSA 描记线，其中内腔被阻塞以防止激射。

[0035] 图 12 示出了诸如图 8 所示的光源实施例的 ASE 光谱。

[0036] 同一种类型的元件和其他细节在不同的图中具有一致的标号。数字中的第一位数字表示图的序号，剩余的数字表示元件或细节的具体类型。

具体实施方式

[0037] 根据本发明的一些实施例，提供了一种可调谐激光系统，该系统提供了由单模光纤输出的超过 5mW 的平均光功率，超过大约 2mm 的动态相干长度，当工作于例如大约 850nm 的中心波长时大约为中心波长 5% 的调谐范围（以 99% 的功率点测量），当工作于例如大约 1330nm 时大约为中心波长 10% 的调谐范围，以及从 0 到 2000000nm/s 连续可调的调谐速度。在一些实施例中，还可以获得直到大约 10000000nm/s 的额外的调谐速度的不连续增大，调谐速度的上限受到适当的高速扫描器或高速可调谐光纤的可用性限制。在一些实施例中，从激光器发射的激光的偏振态是线偏振的且高度稳定。一旦被耦合到单模光纤中，可以通过人工偏振控制器容易地控制偏振态。作为波长函数的强度曲线可能具有非常粗糙的高斯型，可以通过电控制施加到例如基于半导体的增益元件的驱动电流进一步整形以更好地符合高斯轮廓。将会受益于由快速扫描的可调谐激光器，诸如本发明的一些实施例所提供的可调谐激光器提供的改善的性能的应用的例子包括：计量学、光谱学、医学成像和任何其他需要相干长度在大约 2mm 到大约 50mm 的范围内的快速调谐激光器光源的光学技术。

[0038] 图 1 示出了根据本发明的一些实施例的光源 100。如图 1 所示，根据本发明的光源包括光发生部分 101、传输部分 102 和调谐元件部分 103。在本发明的一些实施例中，光发生部分 101 可以包括增益元件，该增益元件具有腔内侧和具有抗反射 (AR) 涂层的外表面或小面，腔内侧具有弯曲波导，外表面或小面抑制自激射并允许元件用作外腔激光器的有效增益介质。增益元件的另一个小面可以包括部分反射表面，例如具有大约 20% 的反射率，用作激光器的输出耦合器。在本发明的一些实施例中，增益元件的两侧可以都涂布 AR，激光腔定义镜面的一侧可以相对于增益元件适当定位。在一些实施例中，输出耦合器的反射率可以在大约 10% 到 50% 的范围内。

[0039] 在一些实施例中，光发生部分 101 可以是用于延长腔激光系统的常规类型。这样的系统典型地包括第一光学腔末端反射器，其常常，但未必总是宽带增益元件的外表面之一。增益元件的另一个表面发射发散光场，用短焦距透镜对其准直。这里可以将光发生部分 101 称为光发生部分或简单称为“第一部分”且其可以含有任意数量的增益元件，以在各种波长实现激射。例如，有源激光增益介质可以由半导体制成，例如镓砷 (GaAs)、铟镓砷 (InGaAs)、镓氮 (GaN)、铟磷 / 铟镓砷磷 (InP/InGaAsP) 和铟磷 / 铟镓砷磷 (InP/InGaAs/InGaAsP)；可以由特定的玻璃（例如硅酸盐或磷酸盐玻璃）制成，包括块状玻璃和光纤，典型地掺有一些稀土离子（例如钕、镱或铒离子）或过渡金

属离子（例如钛或铬离子）；可以由也掺有一些激光活性离子的特定光学晶体制成；可以由气体制成，例如氦和氖的混合物，氮、氩、一氧化碳、二氧化碳或金属蒸汽；或者可以由特定染料的液体溶液制成。

[0040] 光发生部分 101 的束整形光学系统可以从通用于整形或准直激光二极管输出的宽范围光学元件中选择。准直透镜可以是例如 GRIN 透镜或非球面镜头，使用时选择其光学焦距，以在选择光栅提供波长色散时提供对光栅的完全照明。如果第一光学腔末端反射器不是贴附于增益元件的，而是分离的光学元件，那么可以使用附加的准直透镜来准直从增益元件的第一表面发射的光。束整形光学系统可以是例如变形棱镜对或柱面透镜。

[0041] 布置根据本发明的光源实施例以形成与常规单模运转相对的多模激光器。多模激光器是具有多个纵模（即，多个不连续的波长总体构成了激光器的谱线形状）的激光器。通常，改变腔的长度、腔的滤波函数、增益、损耗、对准或激光腔末端镜面的反射属性会改变可以在腔内激射的模式数量（这些条件后面的三个通过改变激射阈值改变模式数量）。如在本发明中所用的，术语“增益介质”可以是任何提供光学增益的元件，包括半导体元件、基于掺稀土光纤的放大器、有机染料或其他材料。术语“扫描的波长”、“调谐的波长”、“调谐的频率”、“扫描的频率”和“灵活波长”通常被理解为可互换。当提到时，“腔滤波函数”为组装之后整个激光腔的有效滤波函数，在光源工作在激射阈值之下时，通过测量系统发射的光的光谱属性测量腔滤波函数。这里可互换地使用术语“光源”和“激光系统”或“激光器”。

[0042] 总体上，根据本发明的光源包括由两个腔末端镜面构建的激光器、增益元件和可调谐波长选择装置。将这些组件放到一起组成一构造，其中，预定腔长（其设定了模式间隔）和腔的滤波函数，使得激光器提供所需的输出特性。主要组件也形成了多模激光器；以下举例说明正确指定每个元件以获得光源的独特特性的任务，该光源具有大于大约 2mm 的相干长度，同时在大约为激光器中心波长的 5% 的波长范围上提供高达大约 10000000nm/s 的扫描速度。

[0043] 如图 1 所示，在本发明的一些实施例中，光发生部分 101 后面可以是传输部分 102，它可以是自由空间部分。或者，传输部分 102 可以包含特定的传播介质，例如光纤。使用光纤的一个优点在于允许进一步压缩根据本发明的光源尺寸以及在例如光源 100 的光源的腔内提供额外的波长选择性。在一些实施例中，可以将传输部分 102 的长度调节仅仅几个毫米到许多米，以调节激光源 100 的模式间隔以及光子在光源 100 的腔内所花的平均时间。

[0044] 光传播部分（或第二部分）102 可以是自由空间或介质，例如单模或单模保偏光纤。第二部分 102 可以形成光源的光学腔内的光程的主要部分。在一些实施例中，可以调节第二部分 102 的长度以优化根据本发明的光源的激光系统的性能。随着长度的变化，光学腔中纵模的距离以及光源的相干属性也在变化。对于光源的每个实施例，可以调节腔的长度，直到在相干长度、调谐范围和光功率方面激光器性能都得到优化。已经用实验方法测试了第二部分具有各种长度设置的激光腔的性能；结果表明可以在非常宽范围的距离上获得令人满意的性能。对于具有短腔长，例如 < 50mm 的光源实施例而言，当外腔对准良好，将滤波后的光高效耦合回第一部分 101 的增益元件中时，可以获

得良好的总性能。这种高效耦合确保了来自增益元件腔内侧的残余反射不会导致作为波长的函数的输出功率的无用调幅。对准不好或者从增益元件的一个或多个内腔小面有显著的剩余反射可能会在输出中导致与波长相关的调幅，其具有由增益元件的自由光谱区给出的频率。在更长的腔长，例如 $> 400\text{mm}$ ，光源的性能仍然能够保持令人满意。不过，随着腔长明显增大到超出该水平，所得的光源的扫描速率可能变得受到限制。这种效应归因于：腔需要足够的时间来允许每个波长实现在腔内通过足够多次数，以获得足够大增益来维持可感知的输出功率。因此，光源的调谐速度具有上限，该上限与腔长、增益元件的增益特性和外腔光学系统中的损耗（包括回到增益元件中时的耦合损耗）相关。

[0045] 快速波长调谐部分 103 接收来自光发生部分 101 并通过了传输部分 102 的光。该快速波长调谐部分 103 从光谱上对所选择波长的光进行滤波并将其向回反射到光发生部分 101。除了波长选择组件之外，调谐部分 103 可以包括光谱光学滤波和反射器装置。光谱光学和滤波装置的反射器部分可以充当激光系统腔的第二光学末端反射器。

[0046] 调谐部分（或第三部分）103 包括一个或多个调谐元件和从传输部分 102 接收光的补充的一个或多个光谱滤波元件。第三部分 103 用于提供对腔光的增强的光谱滤波同时也为激光器提供调谐系统。第三部分 103 还提供形成光源的激光谐振腔所需的高效率回向反射。第三部分 103 提供返回到系统第一部分的内腔光场的选定波长用于放大。

[0047] 以下讨论根据本发明的光源的一些具体实施例，讨论了光发生部分 101、传输部分 102 和调谐部分 103 这些独立部件。已经用实验方法研究了一些实施例的性能，证实获得了预计的扫描速率以及在高频重复率下的调谐，即，达到大约 16kHz 的独立于扫描方向的覆盖相干波长范围的每秒扫描次数，相干长度为 11mm 或更大。此外，在更慢的调谐速度下，相干长度增大。

[0048] 根据本发明的光源的一些实施例形成了这样的可调谐外腔激光系统，具有毫瓦范围的输出功率，几毫米到几十毫米的相干长度，上调谐速度可以实现 SS-OCT 系统中图像的视频速率获取。不过，本发明的各实施例的用途不限于断层 X 线照相术应用，根据本发明一些实施例的激光系统还有望用于需要光辐射相干光源的高速可调谐性的其它测量应用。

[0049] 本发明的一些实施例利用了中等长度的腔，一次往返腔长大约为 0.1 米到大约 1 米，还有补充的光谱过滤器，其窄化腔的滤波函数同时也充当着高效率回向反射器。针对给定的光谱过滤器调节光源的腔长，从而优化激光器的预期性能特性；这些特性可以是相干长度、光输出功率、光输出强度噪声以及光源的尺寸和重量。通常，光谱过滤器的通带越窄，相干长度就越长；不过，希望从激光器获得高输出功率提供了补充光谱过滤器的通带的下限。将附加的光谱过滤器称为补充滤波器是因为，窄大多数市场上可买到的 ECL 设计中，增益元件的孔径与激光腔中通常可找到的光栅一起工作以形成基本光谱过滤元件。本发明获得了从大约 1000nm/s 到大约 10000000nm/s 的调谐速度，对于特定的激光腔构造而言，随着调谐速度的增大，相干长度减小。当工作在大约 2000000nm/s 时，根据本发明的光源范例获得了大约 12mm 的相干长度。测试利用的是中心波长为 $1.33\mu\text{m}$ ，调谐范围大约为 130nm 的系统。图 6 示出了滤波函数固定而扫描速度连续可变的系统的作为调谐速度的函数的相干长度。

[0050] 在 SS-OCT 成像系统中测试了本发明的一个实施例；在以下段落中详细介绍了该特定激光器的设计。在 R.Huber 等人在 *Optics Express*, 2005 年 12 月 26 日第 13 卷第 26 期第 10523 页到 10538 页的文章（“Huber 等人”）中公布了 OCT 成像研究的详细结果，在此将其全文引入以做参考。

[0051] 图 8 示出了根据本发明的光源 800 的略图。测试了光源 800 的实施例并在下文提供了一些测试结果。此外，在 Huber 等人的文章中包括用于进行测量的被设计为光源 800 的系统。如图 8 所示，光发生部分 101 包括增益元件 811 和非球面透镜 812。增益元件 811 长度可以为大约 1mm，估算的折射率大约为 3.5。在一些实施例中，增益元件 811 可以由 InP/InGaAsP 半导体光放大器形成。增益元件 811 的左侧小面充当用于光源 800 的输出耦合器；在一些实施例中增益元件 811 的左侧小面（或输出小面）的反射率估算为大约 15% 到大约 20% 的范围内。如上所述，在根据本发明的光源的一些实施例中，增益元件的左侧小面可以涂布有抗反射（AR）涂层并（可能通过其他光学系统）耦合到反射器。反射器可以是输出耦合器，但在一些实施例中可以形成所得激光腔的基本反射性的端部。

[0052] 在一些实施例中，增益元件 811 可以结合到热电（TE）冷却器，以保持恒温。在一些实施例中，增益元件 811 可以保持在大约 22°C 的温度下。

[0053] 增益元件 811 的腔内侧可以利用弯曲波导和涂有 AR 的小面。在一些实施例中，获得了估算为大约 10^{-4} 的有效腔内小面反射率，这抑制了自激射并允许元件 811 充当光源 800 的外腔的更有效增益介质。来自增益元件 811 的光被耦合到非球面透镜 812 中。在一些实施例中，非球面透镜 812 可以具有 2mm 的焦距并涂布有 AR。在一些实施例中，非球面透镜 812 的两个光学表面都可以是凸面的。

[0054] 在光源 800 中，传输部分 102 为自由空间区域。在一些实施例中，传输部分 102 的自由空间区域可以大约为 370mm。可以利用传输部分 102 的自由空间区域调节光源 800 中形成的腔的总长度。

[0055] 来自传输部分 102 的自由空间区域的光被耦合到光源 800 的调谐部分 103 中。调谐部分 103 包括光栅 813、透镜系统 814、狭缝组件 816 和镜片 815。在一些实施例中，衍射光栅 813 可以具有大约 1017 线/mm 的线密度。衍射光栅 813 可以安装在谐振扫描器 817 上，扫描器 817 提供角位移和特定的工作频率。例如，可以从 Electro-Optical Products 公司获得谐振扫描器 817，该谐振扫描器以 8kHz 的频率提供大约 14 度的总角位移。

[0056] 可以将来自光栅 813 的光耦合到透镜系统 814。在一些实施例中，透镜系统 814 可以是消色差双合透镜。在一些实施例中，可以最佳地布置透镜系统 814 以在多个波长工作。例如，在一些实施例中，在优化透镜系统 814 期间使用三个波长：1.0 μm 、1.3 μm 和 1.5 μm 。在一些实施例中，透镜系统 814 可以具有 45mm 的焦距。

[0057] 透镜系统 814 将来自扫描器 813 的光聚焦到狭缝 816 上。在一些实施例中，狭缝 816 可以是直接结合到宽带介电镜片 815 的反射表面上的 10 μm 的狭缝。在一些实施例中，镜片 815 可以在光源 800 的整个工作范围上具有大于大约 98.5% 的反射率并位于透镜系统 814 的后焦平面处。因而，镜片 815 和狭缝 816 组合形成了光源 800 的激光谐振腔的后反射器。

[0058] 在一些实施例中，光源 800 可以耦合到准直透镜系统（未示出）。例如，准直透

镜系统可以是涂有 AR 的非球面透镜，例如具有 0.7mm 的焦距。在一些实施例中，来自准直透镜系统的光可以耦合到隔离器，例如 -55dB 光隔离器，防止回向反射再次进入光源 800 的激光腔。在一些实施例中，来自隔离器的光可以通过非球面透镜耦合到光纤中。例如，可以使用涂有 AR 的 4mm 焦距的非球面透镜将光耦合到涂有 AR 的单模光纤。

[0059] 可以通过用谐振扫描器 817 旋转光栅 813 对光源 800 进行波长扫描，如图 8 所示。谐振扫描器 817 旋转光栅 813 以扫描通过狭缝 816 的各个波长，由此在调谐激光器时保持恒定的腔长。可以通过考虑如下情形理解照明系统 800 的激光动力学：在镜片 815 和增益元件 811 的部分反射表面之间形成的腔内激射单纵模。如果光栅 813 的旋转轴垂直于由光源 800 的光场界定的平面且光场以旋转轴为中心，那么在旋转光栅 813 的时候，腔长将保持基本恒定。因此，对于光栅 813 很小的旋转而言，腔内没有波长的变化。一旦旋转足以保证下一个纵模具有更低损耗了，光源 800 中形成的激光将跳到该下一模式，激光器的中心频率因此移动一个或几个由腔的自由光谱区给出的纵腔模。在一些实施例中，激光腔的自由光谱区大约为 330MHz。继续转动光栅 813 导致该模式自身重复，由此，作为光栅角度的激光波长（即，光源 800 的输出频率）遵循“楼梯”形的调谐曲线。实际上，光栅 813 的滤波函数的有限宽度可以允许许多纵模同时激射，对于光源 800 的一些实施例而言大约为 80 个纵模。因此，激光器产生了频率梳，以等于纵模间距的步长用逐级的方式调谐。

[0060] 如 L.A.Kranendonk, R.J.Bartula 和 S.T.Sanders 的文章“Modeless operation of a wavelength-agile laser by high-speed cavity length changes” (Opt.Express 13, 1498-1507, 2005 年) 所示，以高速改变腔长产生了类似于频率漂移反馈激光器操作的操作，在 P.I.Richter 和 T.W.Hansen 的文章“Diode-Lasers in External Cavities with frequency-shifted feedback” (Opt.Comm. 85, 414-418, 1991 年) 中对此有所讨论。定义值 R 作为在一个光学往返期间腔模相对于其自由光谱区的相对频率变化。Kranendonk 的参考文献中的激光器利用腔长的迅速变化在值 $R \gg 0.05$ 的无模式情况下调谐，人为引入腔长的迅速变化以实现该无模式运转。相反，光源 800 和根据本发明的一些其他光源以截然不同的腔模进行调谐。

[0061] 在图 8 所示的光源 800 中，在调谐激光器的同时腔长基本没有变化。结果，值 R 基本为 0。因此，这种布置为模式结构提供了最佳的建立时间，已经证明这提供了更高的输出功率稳定性。

[0062] 利用非零值 R 研究了若干其他腔设计，并将性能结果与图 8 所示的光源 800 的实施例的结果进行比较。这些设计具有类似的布局，有着相同的组件顺序，不过腔长有所变化。通过从衍射光栅的旋转轴偏移光轴获得非零值 R 。在每种实例中，发现瞬时相干长度比诸如图 8 所示的光源 800 的实施例短。

[0063] 为了估算在调谐频率的同时光源 800 的实施例的相干特性，在将输出耦合到迈克尔逊干涉仪的同时测量干涉条纹反差。作为干涉仪臂长差的函数测量干涉条纹信号的幅值。观察到在迈克尔逊干涉仪中大约 3.5 到 4mm 的臂长差上有 3dB 降落。通过用光谱分析仪测量输出的谱线线宽，确定激光器未进行频率扫描时静态情形下的相干长度。测量到了 $< 0.02\text{nm}$ 的受分辨率限制的静态线宽，其对应于大于大约 8cm 的相干长度。

[0064] 采用注入电流设定为 45mA 的光源 800 的腔的滤波函数，该注入电流远低于由

InP/InGaAsP 半导体光放大器形成的增益元件 811 的阈值。在一些实施例中，注意确保，在将驱动电流从谱线形状刚开始出现的点增大到从噪声中显露出来的时候，所得的谱线形状的 FWHM 没有显著变化。

[0065] 如图 8 所示，将 $10\ \mu\text{m}$ 的狭缝用作狭缝 816 将腔的通带的 FWHM 限制到大约 0.17nm 。图 8 是在使光栅位置固定在其中心位置的情况下得到的。注意确保随着电流从低于阈值增加到该测量的 45mA ，滤波函数的 FWHM 没有显著改变。测得的激光器阈值电流大约为 62.5mA ，如图 10 所示。图 10 示出了光源 800 的实施例的作为驱动电流的函数的输出功率。图 10 是使用经校准的光功率计获得的。在 22°C 的温度下，阈值出现在大约 62.5mA 的注入电流处。将光谱分析仪 (OSA，型号 AnritsuMS9710A) 设置到其最高分辨率 0.07nm ，并将 1kHz 的 VBW (视频带宽) 用于该次测量。随着电流增大到超过 62.5mA ，在扫描器仍然处于关闭位置的情况下，光谱曲线的 FWHM 迅速变窄到超过 OSA 的测量分辨率。不出所料，激光器的静态线宽显著小于动态线宽。

[0066] 图 11 为如上所述的光源 800 的实施例的增益元件的 ASE 光谱的 OSA 描记线，阻塞内腔以防止激射。增益元件的注入电流被设置为 300mA ，将控制增益元件温度的 TE 冷却器设置为 22°C 。将 OSA 的分辨率设置为 0.07nm ，获取 5000 个数据点。图右侧的结构被认为是由于水蒸汽所致；以下讨论了该图中明显的这些吸收特征和强度调制。

[0067] 图 11 中明显的强吸收线被确认是水蒸汽的结果，最强的线介于 1340 和 1410nm 之间。参见参考文献，M.P.Arroyo 参见参考文献，M.P.Arroyo, R.K.Hanson 在 App. Optics, 第 32 卷第 30 期 (1993) 第 6104-6116 页的文章 “Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser”。研究了腔内水汽吸收损耗对系统的 OCT 成像能力的影响。用干氮对该系统吹扫一夜。在吹扫之前拍摄 OCT 图像；比较未发现任何可识别的效应。不过，预计用于宽规模使用的光源 800 的实施例需要被气密密封在惰性气氛中，对于许多商业生产的外腔激光器二极管系统来说就是这种情况。

[0068] 发现图 11 中明显的快速强度调制与腔内小面的残余反射率造成的增益元件 811 的 Fabry Perot 模式相关。ASE 光谱的这种调制导致扫频激光器的输出光谱中出现振幅纹波。此外，这种噪声导致 OCT 图像中不希望出现的畸变。发现腔内小面上的 AR 涂层的质量和腔的总效率都显著影响着波纹的幅度。

[0069] 为了确保光源 800 的这些实施例在宽调谐范围上稳定运行，以及满足减少上述光谱波纹的需求，可以利用来自外腔的强反馈。强反馈可以定义为条件 $R_{\text{EC}} \gg R_{\text{SG}}$ ，其中 R_{SG} 为增益介质 811 的腔内小面的反射率， R_{EC} 为在考虑所有光学元件，包括回到增益介质 811 的反馈的耦合损耗的时候，延伸腔的有效反射率。参见参考文献 A.Olsson, C.L.Tang 在 IEEE J. of Quantum Electronics QE-17 No8 (1981) pp 1320 上的文章 “Coherent Optical Interference Effects in External-Cavity Semiconductor Lasers”。因此， R_{EC} 取决于光源 800 中的每个光学表面的反射率以及腔内光场的空间模式结构和对准误差。

[0070] 如图 8 所示的光源 800 部分保证了 R_{EC} 在增益元件 811 的发射波长范围上相对独立于波长且还保证了腔长的变化不会对光源 800 的性能产生负面影响。光源 800 包括通常被称为“猫眼”构造的透镜 814 和镜片 815 的组合，其中镜片 815 处于透镜系统 814

的焦平面中。图 8 所示的光源 800 的光学装置可以提供反馈对回向反射器角失准降低的敏感性，同时也确保了在增益元件 811 的整个 ASE 光谱上具有良好的光学性能。参见参考文献 JJ.Snyder 在 *Applied Optics* 第 14 卷第 8 期 (1975) 第 1825 页的文章 “Paraxial ray analysis of a cat's-eye retro-reflector”。图 12 示出了光源 800 的实施例的 ASE 光谱，是利用如上所述相同的 Anritsu OSA 产生的，该 OSA 启用了峰值保持特征和 20ms 的取样间隔。OSA 分辨率带宽被设置成 1nm，利用 Anritsu 型号 MS9710A 的 OSA 的 20ms 峰值保持特征获取 500 个数据点。所确定的半最大值全宽大约为 122nm，平均输出功率为 15mW。

[0071] 利用 OSA 的峰值保持特征以从光源 800 获取大量正向和反向扫描并求平均，由于频谱分析仪固有的低瞬态响应，该光源 800 工作在 16kHz。应当注意，由 OSA 获取的光谱数据将会被调谐部分 103 的基于谐振扫描器的调谐元件的正弦特征扭曲。增大扫描幅度使之超过激光器的调谐范围，将光源 800 的占空因数设置为低于 85%，从而使这种效应最小化，从而确保利用正弦扫描器机构的更为线性的部分。

[0072] 在来自光源 800 的实施例的激光输出被耦合到单模光纤之后测量的平均光功率大约为 15mW。对于谐振扫描器的每次完整周期，光源 800 的实施例产生了其波长范围的一个正向（从短波长到长波长）和一个反向（从长波长到短波长）扫描。发现正向扫描稍微高于输出功率大约 10%。不过，在单独测试激光器的正向和反向扫描的成像特性时，它们的质量有很少或没有差别。估算峰值输出功率大约为 30mW，这大约是在光源 800 为静态时获得的功率，在图 12 中示出了在 ASE 曲线的近似峰值处的激射。因此，450mm 的腔长足够短了，从而即使在 16kHz 的重复率下扫描腔的时候，也允许每个波长有足够长时间达到其饱和功率。

[0073] 如以上参考图 8 所示，根据本发明的光源 800 包括位于具有快速调谐部分 103 的多模激光腔中的增益元件 811。可以用于这些元件的每个组件都具有要被考虑的特定的折衷影响。对于每种特定的设计指标，在考虑到这些折衷影响的同时认真选择光部分 101、传播介质 102 和调谐部分 103 中的组件。

[0074] 增益元件 811 的选择首先基于希望的中心波长、总调谐范围和光输出功率。一旦决定了满足这些主要参数的材料，通常选择具有最大调谐范围和最高输出功率的元件作为第一候选者。调谐范围由所考虑的增益元件的 ASE 光谱图表示。光功率由增益元件 811 的光学损伤阈决定，光学损伤阈通常受增益元件 811 的输出小面限制。增益元件 811 的长度连同其折射率将决定着增益元件 811 的自由光谱区 (FSR)。FSR 将是如前所述的激光器的波纹的特征频率，或者如果转换为波长，是特征波长。例如，如果光源将用作 OCT 光源，那么来自增益元件 811 的该波纹（如果其足够大）将会造成重影。该重影（主像的重复，仅仅在深度上有偏移）将发生在与增益元件 811 的光程长度相关的深度处。在 R.Huber 等人的文章中讨论的范例增益元件中，形成了在大约 3.55mm (1mm 乘以材料的折射率 3.55) 处的重影。尽管在诸如 Huber 的工作中所用的范例的高散射介质中这可能不是重要的问题，其他应用可能会受到存在这种重影的影响。将增益元件 811 的长度延长到例如其原始长度的两倍，或者例如延长到 2mm，可能会潜在地将重影偏移到利用增益元件 811 的成像装置的原像的范围之外。

[0075] 一旦确定了增益元件材料和增益元件 811 的长度，然后就能够选择增益元件 811

的小面的反射率。两种基本的方法已经提供了合理的结果。一种是选择左侧小面（参考图 8，增益元件 811）具有最高可能的反射率的增益元件；理想情况下该反射率应当在 90% 或更高的范围内。那么将由部分反射器取代图 8 中由元件 815 表示的镜片构成激光腔，以便部分反射器充当所得的激光器的输出耦合器。这常常是第一预备性选择，因为它允许对系统进行功能测试，从而可以针对特定的激光器设计确定最好的输出耦合器反射率。该方法是有利的，因为通常更换元件 815 要比改变增益元件 811 的小面的反射率更为容易。

[0076] 第二种方法是在 20% 的范围内选择增益元件 811 的反射率和光源的设计，使得输出耦合器为增益元件 811 的左侧小面。在两种情况下，增益元件 811 的另一小面都涂有 AR，理想情况下还利用弯曲波导减少残余反射率。一旦已经处理过（利用 ECL 生产领域公知的涂层技术进行涂布）增益元件 811 获得了所需的反射率，利用 OSA 测试增益元件以确定其 ASE 光谱以及光谱中存在的波纹程度。如果发现该波纹具有与腔的标准模式匹配的波长段，并且如果波纹的幅度小于 5%，那么如果波长范围也是令人满意的就假定增益元件是适当的。如果是在 5% 到 10% 之间，需要注意确保腔的其余部分具有相当低的损耗，且从延长的腔返回到增益元件的反向耦合的强度大。实际的目标应用将为波纹设置上限。

[0077] 在进行了增益元件 811 的选择之后，然后可以考虑图 8 中的准直光学透镜系统 812。这里，主要的因素是在希望的波长处和希望的波长范围上的透镜系统的光学性能。理想情况下，透镜系统将提供接近衍射受限的性能；不过，因为从大部分半导体增益元件发射的光场远不是理想的，因此可以在透镜系统 812 中使用很宽范围的光学元件。有很多已经测试过并证明可提供令人满意的结果的廉价的模制玻璃非球面透镜以及 GRIN 透镜。其他关心的问题是 AR 涂层的质量以及可能会限制光源 800 的调谐范围的任何色彩效应。选择光学系统的焦距，使得准直束的直径能够完全照射调谐部分 103 的衍射光栅，以提供波长调谐部分的最大波长分辨率。衍射光栅的性能和后面将要描述的消色差双合透镜的性能都受到光束直径的影响。

[0078] 传播介质 102 可以是形成于增益元件 811 的反射表面和镜片 815 之间的腔的自由空间，可以将其用于调节相邻纵腔模之间的空间；做这种调节以实现每单位时间恰当数量的腔模在其调谐时通过腔的滤波函数，并针对给定构造的波长调谐和选择部分提供足够数量的落在滤波函数内的模式。在总相干长度大致由形成于腔中的滤波函数的宽度决定的情况下，激光器的稳定性、在调谐范围上相干长度的均匀性，强度噪声，以及波纹可能全部受到对腔全长的选择的影响。典型地，可以实现短的腔长，同时确保光源的设计目标。波长调谐和选择部分的分辨率是缩短腔长的能力中的重要因素。

[0079] 接着，选择衍射光栅 813。如图 8 中所用的光栅 813 的尺寸通常受到高速谐振扫描器 817 能够支撑的质量的限制。因为增益元件 811 的输出束通常是椭圆形的，可以选择衍射光栅 813 使之具有一长宽比，该长宽比最大限度地利用了光栅的可用质量预算，或者可以利用例如变形棱镜对改变光束形状。R. Huber 等人的文章不需要束整形光学系统的额外复杂性，因为光束形状和光栅上的大入射角提供了对可用光栅面积的良好利用。选择光栅时主要关心的事情为其在相关波长范围上的效率。此外，如果实际中入射光场具有一种偏振的话，应当认为入射光场的偏振与衍射光栅的优选偏振对准。可以选择线密

度，使得可以在由消色差透镜和狭缝 / 镜片组件界定的光轴上扫描衍射光场。此外，希望将激射行为限制在扫描时间的大约 80% 到 85% 进一步限制了对线密度的选择，理想情况下将会使线密度尽可能高，以为腔提供尽可能最窄的滤波函数。通过选择狭缝宽度进一步定义该滤波函数。更宽的狭缝通常会获得更大的输出功率，不过通常也会造成光源更短的相干长度。

[0080] 在图 8 中在光栅之后的下一个组件为消色差双合透镜 814。消色差双合透镜从衍射光栅 813 接收经准直但仍分散的光束并将沿着通过狭缝的光轴传播的特定波长聚焦到高反射器上，该高反射器形成了光源 800 的腔的后端镜片。由于消色差镜的质量部分地决定着波长选择部分的滤波函数的形状，该元件应当在整个相关波长范围上提供近似衍射受限的性能。由于几何结构的原因，仅仅沿着或非常接近光轴通过系统的光才能够返回到增益元件中被放大，所以该透镜需要在宽波长范围上具有非常好的轴上性能。这是通过利用分布在相关波长范围上的一组波长设计消色差镜实现的。此外，消色差透镜系统 814 上的 AR 涂层的质量被认定起到重要作用。利用消色差透镜系统 814 的两个透镜上的高质量 AR 涂层以确保外腔中的低损耗。

[0081] 至于消色差透镜系统 814 的焦距，测试了一定范围的焦距，在大约 15mm 到大约 50mm 的范围内获得了良好性能。发现更短的焦距在波长范围、功率和相干长度方面提供了稍微好些的总性能。尽管在 Huber 等人的文章中描述的光源具有 45mm 的消色差透镜系统，使用更短焦距的光学系统可能会获得更好的效果。选择消色差透镜系统 814 也可以考虑腔能够支持的最大直径的光束。典型地，直径越大，性能越好。不过，如果使用较短焦距的消色差透镜，那么就需要考虑它们的小直径。这里，设计的挑战是提供最大程度的波长选择性，同时在滤波器的中心波长处提供尽可能最低的损耗。

[0082] 图 8 中要考虑的下一个组件是狭缝 816。该元件允许光源 800 形成的滤波函数的中心波长通过而阻挡其他波长。通过设计仿真和试验，发现宽度在 $5\mu\text{m}$ 到 $15\mu\text{m}$ 范围内的狭缝可提供狭缝 816 最好的总体效果，具有令人满意的功率和相干长度。当消色差透镜系统 814 的焦距靠近该范围的短端时，那么较小宽度的狭缝工作更好。狭缝可以从 NationalAperture 商业购得，是用激光在金属箔中加工的并弄黑，以便最小化不希望的回向反射。

[0083] 固定狭缝 816 的镜片 815 理想地在光源 800 的波长范围上具有基本为 100% 的反射率。利用 Thorlabs 公司提供的高质量宽带镜片近似可以实现该目标。

[0084] 如上所述，在调谐部分 103 中使用猫眼构造提供了在宽波长范围上具有良好性能的设计，同时也提供了如前所述的对失准相对容忍的系统。

[0085] 根据本发明的光源的其他实施例在图 1-5 中示出。如下文所述，狭缝镜片被理解为表示形状为窄宽度狭缝的反射器，例如镜片；后面紧靠镜片的透明狭缝；或者后面带有反射器以及光学系统的透明狭缝，该光学系统将辐射往回反射通过狭缝。此外，在光辐射的上下文中术语“光”代表可见、紫外或红外辐射。

[0086] 图 1 示出了根据本发明的光源实施例 100。光源 100 由可调谐激光器形成，该可调谐激光器从第一末端反射器 11 延伸到第二末端反射器 19。例如，在第一末端反射器 11 或第二末端反射器 19 处，或者利用最初入射光的反射或从色散性元件 16 向回反射的色散光，或者通过将光分束器插入到光源 100 的激光腔中的光束路径中，通过常规方法进行

对光功率的一部分的假设向外耦合。在光发生和光学增益介质 12 中产生辐射。然后光通过光束转换光学系统 13。经准直的来自 13 的输出光束进入传播介质 14。辐射可以在介质中自由传播，或者束缚于信道，例如光纤。通过适当地选择介质，可以选择腔的光程并由此选择激光装置中的纵模距离。离开传播介质 14 的准直束 a 直接或者由运动反射器改变方向之后入射到色散性元件 16。利用快速机械旋转器 15 旋转色散性元件 16。来自色散性元件 16 的光被耦合到聚焦光学系统 17，照射到狭缝镜片 19 上，该狭缝镜片 19 位于聚焦光学系统 17 的焦平面中。

[0087] 图 2 示出了根据本发明的光源的另一实施例 200。如图 2 所示，来自传播介质 14 的光入射到扫描镜片 210 上，扫描镜片 210 安装于快速机械旋转扫描结构 15 上。来自扫描镜 210 的光被耦合到消色差透镜 11，消色差透镜的位置使得扫描镜 210 在其焦平面中。来自消色差透镜 11 的光被耦合到消色差透镜 212，消色差透镜的焦距使得扫描镜 210 位于透镜 212 和 211 的组合焦距处。光栅 16 大致位于离开透镜 212 透镜 212 的焦距处。那么，量 $\alpha(\lambda_0)$ 就是波长为 λ_0 的准直束。

[0088] 在图 1 和图 2 中，作为所有波长的准直束，经色散的光束 b 被透镜系统 17 聚焦到滤波反射狭缝镜片 19 上。分别由图 1 中的运动色散性元件 16 和图 2 中的运动反射器 210 在狭缝镜片 19 上扫描波长。

[0089] 在图 1 中所示的实施例中，色散性元件 16 通过快速机械扫描结构 15 而转动。经色散的辐射 b 被聚焦到末端狭缝镜片 19 上。

[0090] 在图 2 中所示的实施例中，通过由安装于快速机械旋转扫描结构 15 上的镜片形成的快速旋转机械反射器结构扫描反射器 210 和由透镜 211 和 212 形成的光学系统从角度上移动入射的准直束。根据镜片 210 的瞬时旋转位置，准直束 a 以不同的入射角入射到静止的色散性元件 16。于是，利用镜片 210 的快速旋转改变了由末端狭缝镜片 29 反射回来的色散辐射的波长。

[0091] 在图 3 中所示的实施例中，静止色散性元件 16 以取决于波长 λ 的角度引导准直的色散光束 b。在聚焦光学系统 17 的焦平面 18 中形成了光谱。通过固定于转轮上的狭缝镜片组件 313 扫描焦平面 18 中的光谱。狭缝镜片组件 313 是置于聚焦光学系统 17 的焦平面 18 中的轮子，具有狭缝镜片的周边规则图案。运动的条形镜片构成了光学腔的第二末端反射器。由驱动马达 314 驱动狭缝镜片组件 313。

[0092] 在图 4 中所示的实施例中，采用了图 1 和 3 所示的实施例的组合物。这种布置使得能够为图 1 和 3 的两个不同扫描模式使用同一个装置。在扫描模式中，色散性元件 16 在扫描，而轮子上的狭缝镜片 313 之一被用作静止的末端狭缝镜片。在另一实施例的扫描模式中，色散性元件 16 是静止的，而具有狭缝镜片组件 313 的轮子是旋转的。

[0093] 在图 5 中所示的实施例中，光谱光学滤波装置为沉积在色散性元件 16 前方的透镜系统 515 内部的狭缝或针孔。透镜系统 515 为具有内部光谱过滤狭缝或针孔的光学透镜系统。在一些实施例中，透镜系统 515 可以由透镜对形式的光谱过滤器形成，该透镜对分隔它们焦距之和，在第一透镜的焦点处设置处于大约 $5\mu\text{m}$ 到大约 $25\mu\text{m}$ 范围内的窄缝。因此对于该构造而言，可以认为光谱滤波元件是嵌入到第二部分 102 中的。图 5 中所示的色散性元件的布置可以是被称为 Littrow 构造的类型，而其他四个优选实施例可以使用改进的 Littman 型构造。

[0094] 图 1-5 中所示的激光系统的实施例都示出了第一和第二部分相同的元件布置，仅仅第三部分改变为每种新构造。在一些实施例中，图 1 中示出的且被称为“腔的第一末端反射器”的第一光学表面 11 也可以是增益元件的低反射率输出表面，其具有类似于图 3 的透镜 37 的附加透镜，该附加透镜用于准直来自增益介质 12 的表面 11 的光辐射输出。可以将分离的末端反射器耦合到增益元件 12 以形成腔。

[0095] 在一些实施例中，图 1 中所示的可移动波长色散装置 16 和图 2 中所示的扫描镜 210 都位于快速角扫描装置 15 上。可以适当地由谐振模式中的检流计或类似机构、线圈感应机构、压电机构、电光光束偏转器、声光光束偏转器、MEMS 基光束偏转器或电动机机构驱动角扫描装置 15。

[0096] 在试验测试诸如图 1 所示的光源实施例 100 期间，使用谐振扫描器转动光栅。选择第二部分的输出使其为自由空间光束，如此对该光束进行准直，使得准直束近乎完全地照射本实施例的第三部分 103 中包含的衍射光栅 16。第三部分 103 包括谐振扫描器 16、衍射光栅 15、透镜 17 和 $10\mu\text{m}$ 的窄狭缝镜片 19，该镜片为直接贴附于镜片上的 $10\mu\text{m}$ 的狭缝。已经为用于本发明的实施例中而成功测试过的一系列谐振扫描器 16 为来自纽约 Glendale 的 Electro-Optical Products 公司的型号 SC-30 型；所测试的范围内的扫描器提供了在 10kHz 到 24kHz 范围内的激光重复率。取代在这种装置中通常提供的镜片，将衍射光栅 16 直接安装到谐振扫描器 16 的运动部分上。光栅 16 制造于大约 1mm 厚的衬底上，从大约 6mm 高大约 8mm 宽到大约 5mm 高大约 6mm 宽。实际尺寸取决于谐振扫描器的具体谐振频率，随着扫描器频率的增加，光栅的质量降低。被测光栅的线密度处于 800 线每毫米到 1100 线每毫米的范围内；在每种实例中，都可以调节激光器的第二部分的长度以最大化激光器的动态相干长度以及激光器的其他工作参数，例如功率、波长调谐范围、稳定性、光输出噪声和增益元件中不希望的标准具效应的抑制。

[0097] 来自第二部分 102 的准直光场会进入第三部分 103 并入射到衍射光栅 16 上。使入射角最大化以照射光栅 16 的最大区域并提供由第一部分 101 的宽带增益元件 12 产生的光的最大角色散。然后色散光入射到高质量消色差透镜 17 上，因此然后将色散光场聚焦到窄缝和镜片组件 19 上。测试获得好结果的透镜或者是为用于增益介质的波长范围中而设计的高质量消色差镜，或者是玻璃非球面透镜。所有的透镜都使用高质量的多层减反射涂层以最小化腔内损耗。成功使用的焦距对于消色差透镜而言处于大约 10mm 到大约 50mm 的范围内，对于非球面透镜而言处于大约 6mm 到大约 8mm 的范围内。

[0098] 本部分最后的光学部件，即狭缝镜片 19 包括被切割成直径为 $3/8''$ 的薄箔的窄缝。成功测试的狭缝宽度在宽度上处于 $5\mu\text{m}$ 到 $25\mu\text{m}$ 的范围内，在高度上为 3mm。然后将狭缝安装为直接接触高质量镜片以形成狭缝镜片 19。提供最好结果的镜片为市场上可买到的镜片，其特征在于宽带介电膜，该介电膜在相关波长范围上是高反射的。参见用于 $1.3\mu\text{m}$ 波长范围的 Thorlabs 型号 BB1-E04 和用于 800nm 波长范围的 BB1-E03。该透镜放置得距光栅 16 大约 10 到 20mm，发现透镜 17 和光栅 16 之间的距离对于激光器的有效运行不是非常重要；不过通常当透镜 17 放置得距光栅 16 更近一些时，会发现相干长度和输出功率的轻微改善。在谐振扫描器 15 关闭的情况下，透镜 17 被放置于系统的光轴上。在这种情况下，光轴被定义为在宽带增益元件 12 发射的自发发射光离开光栅 16 沿着光栅特征和入射光场的入射角界定的方向传播时，由其中心波长定义的路径。这样

定位的透镜 17 用于将光场聚焦到一个焦距之外的区域上。这里，如此放置狭缝和镜片组件，使得其同时充当激光谐振腔的光谱滤波元件以及回向反射器。

[0099] 在恰当对准并向第一元件施加完整电功率的条件下，上述光源实施例 100 将会激射。当打开谐振扫描器 16 时，光源 100 会开始在由增益介质 12 和腔损耗决定的波长范围上进行扫描。在激射的时候，对于增益元件测试之一，输出功率大于 15mW。测试表明，调谐范围大于 138nm，测得的相干长度 ($L_c = 2 \times$ 迈克尔逊干涉仪中干涉条纹反差测量值的 HWHM) 长于 11mm。成功测试了若干增益元件。所选择的实际增益元件将取决于所需的期望中心波长、光强度和调谐范围。半导体增益元件可以很容易地从若干供应商（例如加利福尼亚 Livermore 的 InPhenix 公司）那里得到。

[0100] 图 1 和 3 中所示的实施例之间的比较得出了如下的结论。图 1 中所示光源 100 的光学布置显然比图 2 中所示的光源 200 的光学布置简单得多。另一方面，能够迅速移动的色散性反射器 16 的尺寸相当有限。商用的工作在 5kHz 到 20kHz 范围内的谐振扫描机构在它们能够支持的光学元件的尺寸上受到限制。对于这些实验中所用的谐振扫描器，对于 5kHz 的扫描器，用于色散性元件 16 的衍射光栅大约是 5mm 高，8mm 宽，1mm 厚，对于更高频率的扫描器，光栅更小。这限制着能够被照射的光栅线的数量，因此也限制着能获得的光栅分辨率。在图 2 中所示的实施例中并没有相应的限制，因为与必须非常倾斜地入射到扫描光栅上相反，可以在扫描反射器上使用接近垂直的入射光束。在图 2 所示的光源 200 中使用的静止光栅允许比在图 1 所示的光源 100 中所用的旋转光栅大得多的光栅面积。

[0101] 用作滤光端镜的狭缝镜片 19 是一种制造复杂的元件。在实验中，成功地使用了与下方的镜片膜接触的金属箔中的狭缝。狭缝制造得越窄，滤光行为变得越好。不过，激光辐射的强度同时会自然下降。在实验中，发现 5-25 μm 范围内的狭缝镜片宽度最适合滤光和强度性能之间的均衡；不过也可以使用其他狭缝宽度。

[0102] 如果具有可调节宽度的狭缝镜片对滤光有利，可以使用光谱仪缝隙与狭缝后面的回向反射光学系统。该光学系统将会把狭缝成像到自身上。设置具有准直透镜的平面镜或平面镜和两个透镜以准直来自狭缝的光并随后对其聚焦，然后利用放置在第二透镜的焦点处的镜片对其进行反射。或者，凹面镜可以实现该目的。此外，可以将两个可以移动的不透明板固定就位在镜片上或与其紧密接触。为此目的测试了两个刀片，一个刀片附着于平移台，另一个固定到镜片的表面；这种方法提供了令人满意的结果。

[0103] 在图 3 和 4 所示的实施例中，使用了旋转的滤光和回向反射装置 13。以等间距靠近转轮的周边设置若干狭缝镜片；在校准定位台的辅助下将在金属箔中加工的薄狭缝贴附到 50mm 直径的镜片上提供了可行的方案。然后将轴附着于镜片和狭缝组件的背面以提供完成的回向反射轮 13。由作为驱动马达 14 工作的电动机驱动该轮。扫描时间，即狭缝镜片之一沿一个方向扫描相关波长范围所需的时间，不能做到与图 1 和 2 所示实施例中可以用的快速谐振扫描机构一样短。与更快的谐振扫描机构相比，电机驱动的转轮的优点在于扫描时间可以连续变化。

[0104] 两种扫描原理的组合在图 4 中示出。同时扫描为一些应用提供了以较慢速度获取图像的强有力的工具，否则的话，这些应用会导致数据集大到无法管理。此外，在 OCT 应用中使用该系统时较慢扫描速度的延长的相干长度具有潜在价值；例如在食

道中，组织和探头之间的距离可能会有显著变化，延长的相干长度可允许更大的成像范围。

[0105] 在图 3 中所示的实施例中，第三部分 103 包括静止光栅 16，透镜 17 和旋转的多狭缝镜片 313。被测光栅 16 的线密度在 800 线每毫米到 1070 线每毫米的范围内。在每种情况下，可以调节激光器的第二部分的长度，即腔的长度，以优化动态相干长度、功率、稳定性、光输出噪声以及对增益元件内不希望的标准具效应的抑制。来自第二部分 102 的准直光场进入第三部分 103 并入射到衍射光栅 16 上。使入射角最大化以照射光栅 16 的最大区域并提供由第一部分 101 的宽带增益元件 12 产生的光的最大角色散。由高质量透镜 17 俘获色散光并将其聚焦到图像平面 18 上。在图像平面中，给定波长的光由垂直线表示；在该图像平面上运动，会遇到不同的波长。

[0106] 测试结果良好的透镜是为用于增益介质的波长范围中设计的高质量消色差透镜。所有的透镜都使用了高质量的多层抗反射涂层，以使腔内损耗最小化。成功使用的焦距在 30mm 到 50mm 的范围内。测试了单透镜配置以及多透镜配置；在光功率和相干长度方面多透镜配置提供了稍好的性能。该部分最后的光学组件由多狭缝镜片 313 构成。该狭缝镜片具有 20 个反射性狭缝，每个狭缝为 20 μm 宽。反射性表面为受保护的铝。利用划片机从 20 μm 反射性狭缝的任一边除去大约 700 μm 的材料；用黑色遮蔽胶带覆盖反射性狭缝之间的剩余反射性区域。还有其他几种测试结果良好的狭缝镜片，例如加工到安装在由 Al 保护的镜片上的薄箔盘中的几个狭缝。多狭缝镜片安装在无刷伺服电机 Ventura Ca. 的 Thingap 公司的 P/N TG2385-Delta 上，该电机由 Advanced MotionControls Brushless 伺服放大器 P/N B30A8 驱动。标称电流为 45V 时 4A 的电流。所用的电源为台式 BK 精确 60V 6A 直流电源。

[0107] 能够使用的狭缝数量是由所选的衍射光栅 16、透镜 17 的焦距、透镜 17 的直径尺寸、腔中增益介质 12 的波长范围以及希望的光源占空因数的组合设定的。

[0108] 透镜 17 可以是 Thorlabs 消色差透镜 AC254-050-C，距离光栅 16（光栅上光束入射到透镜单元前边沿的点）38mm。从透镜单元（SMI L05）的前边沿到反射性狭缝的距离是 50mm，当激光器电流为 299.7mA，马达以 132Hz 运转时，给出了 111nm 的调谐范围的 3dB 点。根据扫描时间，测得的所得激光器的相干长度在 17.2 和 28.7mm 之间。

[0109] 在扫描时间和所产生的辐射的相干长度之间有一种联系。在利用多狭缝镜片进行的试验中，如上所述研究了这种关系。利用基于光纤的麦克耳逊干涉仪测量作为扫描时间函数的辐射相干长度。图 6 示出了垂直绘制的单位为 mm 的相干长度和水平绘制的单位为 μs 的扫描时间。图 6 中所示的曲线清楚地示出了相干长度随着扫描时间减小而呈现线性减小。

[0110] 分别在图 3 和 4 中示出的光学系统 17 应当消色差质量非常好，以给出几乎完美的平坦聚焦区。对于由透镜 211 和 212 形成的透镜系统以及其在两个透镜之间实现平面聚焦区的能力，这点也适用。

[0111] 图 5 中示出的实施例展示了根据本发明的光源实施例的最不复杂的构造，易于给出高输出能量。在试验中，在图 5 的实施例中使用的透镜系统 515 的两个透镜为 Thorlabs C170TM-C， $f = 6.16\text{mm}$ ，透镜之间的狭缝为 10 μm 宽。实现了 22mW 的连续功率，并且根据腔长测量到相干长度为大约 2 到大约 4mm。波长调谐范围为 130nm 左

右。

[0112] 图 7 示出了根据本发明的紧凑扫描激光器的另一实施例。在图 7 所示的实施例中，使光束偏转到光栅（由 $b(\lambda)$ 表示）的扫描镜片 15 还充当着 Littrow 构造中的末端镜片。在一些实施例中，也可以如图 7 所示使用光谱滤波部分。图 7 所示的光源实施例与图 1-5 和 8 所示实施例显著不同，不同之处在于，总的腔长有很大变化，这源自于将 Littrow 取向的衍射光栅用作腔的第二末端反射器。随着由扫描镜片 75（其包括安装于快速机械旋转扫描结构上的镜片）在衍射光栅 16 上扫描准直光束，扫描镜片的中心和衍射光栅 16 之间的距离发生变化，如从图 7 中所清楚看出的。专利' 355 采用了类似的几何结构；不过，专利' 355 在扫描镜片和光栅之间的距离、扫描镜片到前小面反射器的距离以及中心波长处在光栅上的入射角之间进行了均衡，以便为轴向模式调谐提供第一阶补偿。专利' 355 提供了对这样的系统的分析，该系统可被用于确保在激光器的调谐范围上调节和 / 或配置激光器以工作在近似单模状态，于是避免了几乎所有遇到的几万个模式跳变（如在 ECL 系统的现有技术中所公知的）。在单模点工作需要很多工作，除非系统还有消除进行过第一阶校正之后留下的残余模式跳变的装置，在光源的整个调谐范围中动态相干长度就是飘忽不定且不均匀的。在图 7 所示的设计的一些实施例，人为调节相同的这些距离，从而在调谐系统的时候引入大量的模式跳变，估计为几千或几万个模式跳变。这种方法提供了比现有技术中所知的真正无跳模的可调谐激光器可能获得的相干长度短很多的相干长度；不过，这确保了我们能够实现我们的目标：提供相干长度大于几毫米的鲁棒激光器。在图 7 所示的光源的一些实施例中，获得了达到 4mm 左右的相干长度。专利' 355 的腔的几何结构得到了仔细的均衡，使得纵模数量 N 的抛物线增大具有发生在激光器中心波长处的最小值。被配置为使作为波长的函数的 N 在系统的调谐范围内不经过最小值的系统工作得更好。这种配置确保了，在激光器的波长范围上扫描激光器的时候，在波长的每单位变化中 N 具有显著的变化。已经证实，以提供 N 的这种变化的几何结构工作在激光器的整个调谐范围上提供了高度稳定的相干长度，然而如按照专利' 355 那样操作同样的经均衡的激光器以提供第一阶补偿通常不会获得同样的这种性能。此外，多模系统比专利' 355 中披露的单模系统工作得更好。

[0113] 通常，利用相干长度大于 3mm 左右、调谐范围超过中心波长的 5% 到 10%、工作在 850nm 范围的激光器功率大约为 0.5mW 或更大，而工作在 1300nm 范围的激光器功率大约为 5mW 或更大、扫描重复频率大于 10kHz 左右以及波纹小的根据本发明的光源，诸如 OCT 的成像应用工作得最好。此外，需要对模式间距以及能够同时激射的模式数量进行平衡，使得通过均衡的探测方案基本可以消除功率波动或强度噪声并且在系统扫描时相干长度不发生变化。相干长度部分取决于腔的滤波函数，腔的滤波函数又最易于通过改变快速波长调谐部分的滤波函数而加以调节。在一些应用中相干长度在调谐范围上的稳定性可能很重要，通过改变腔所支持的模式间距及数量对其加以调节。调谐范围取决于增益元件、组件损耗、波长相关的组件损耗、扫描器幅度（扫描器幅度是否足以覆盖增益元件产生的宽范围频率）以及衍射光栅特性或所选择的无论什么波长调谐和滤波元件的特性。如果扫描元件提供正弦曲线扫描，那么，如果扫描元件的幅度宽到足以覆盖增益元件带宽的 120% 左右，该扫描元件就是有用的。光栅的设计取决于划线、闪耀、入射角和照射区域。

[0114] 腔长可以是短的、中等的、长的，或者可以变化。短腔具有更宽的模式间距，因此对于固定的滤波器函数而言具有更少的模式；不过，由于光子在腔内往返时间的原因，长的腔长限制了扫描速率。激光器的功率取决于光学增益元件、腔内光学组件的损伤阈值、工作频率和腔的损耗。模式间距可以是明确的并取决于腔的光程长度。腔内支持的模式数量取决于滤波器函数、腔内的损耗、增益和腔的对准。滤波器函数取决于腔的几何结构、狭缝镜片的狭缝宽度、衍射光栅和波导。光源的扫描速度取决于扫描器、衍射光栅和光在光栅上的入射角，以及激光器的波长范围。

[0115] 通过考虑这里公开的说明书和本发明的实践，本发明的其他实施例对于本领域的技术人员将是明显的。应当将说明书和范例仅仅看作示例性的，本发明的真正范围和精神由如下权利要求界定。

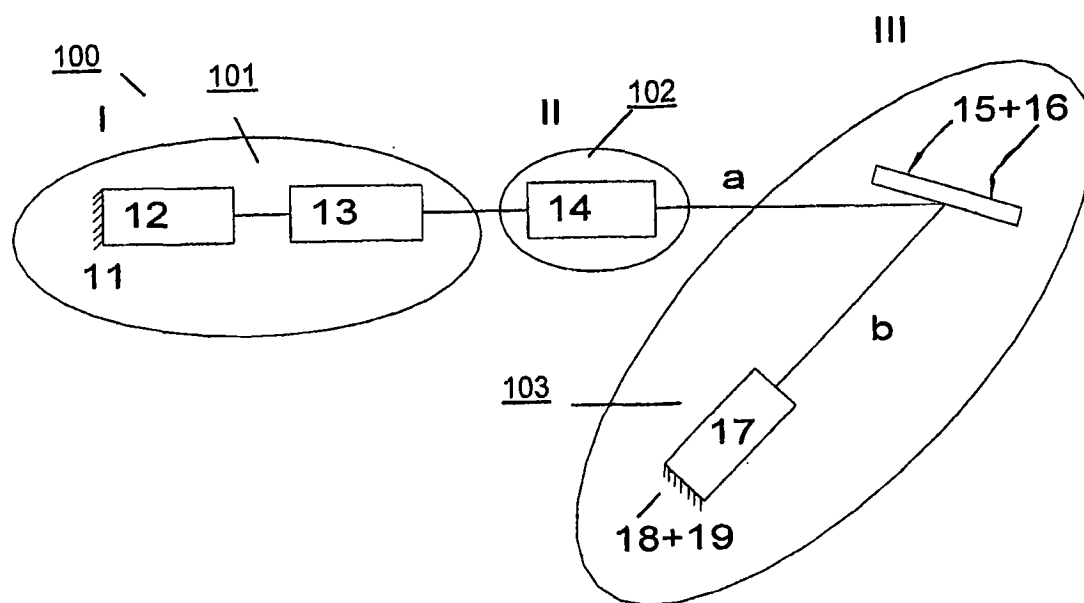


图 1

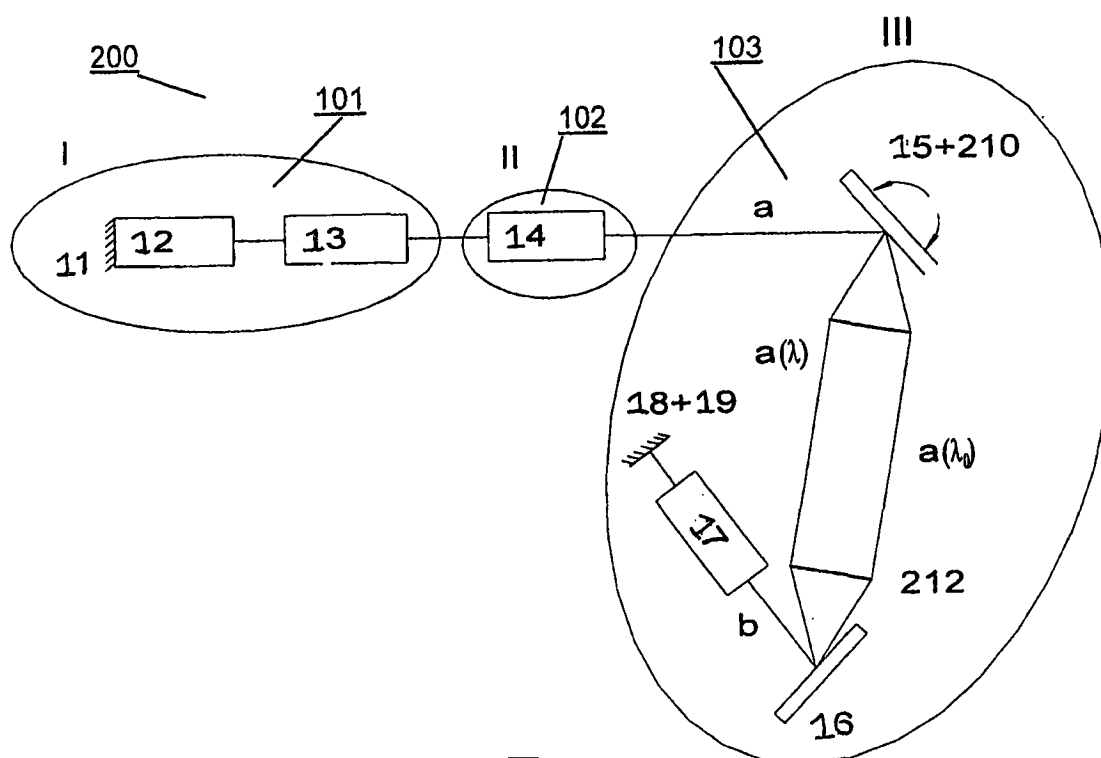


图 2

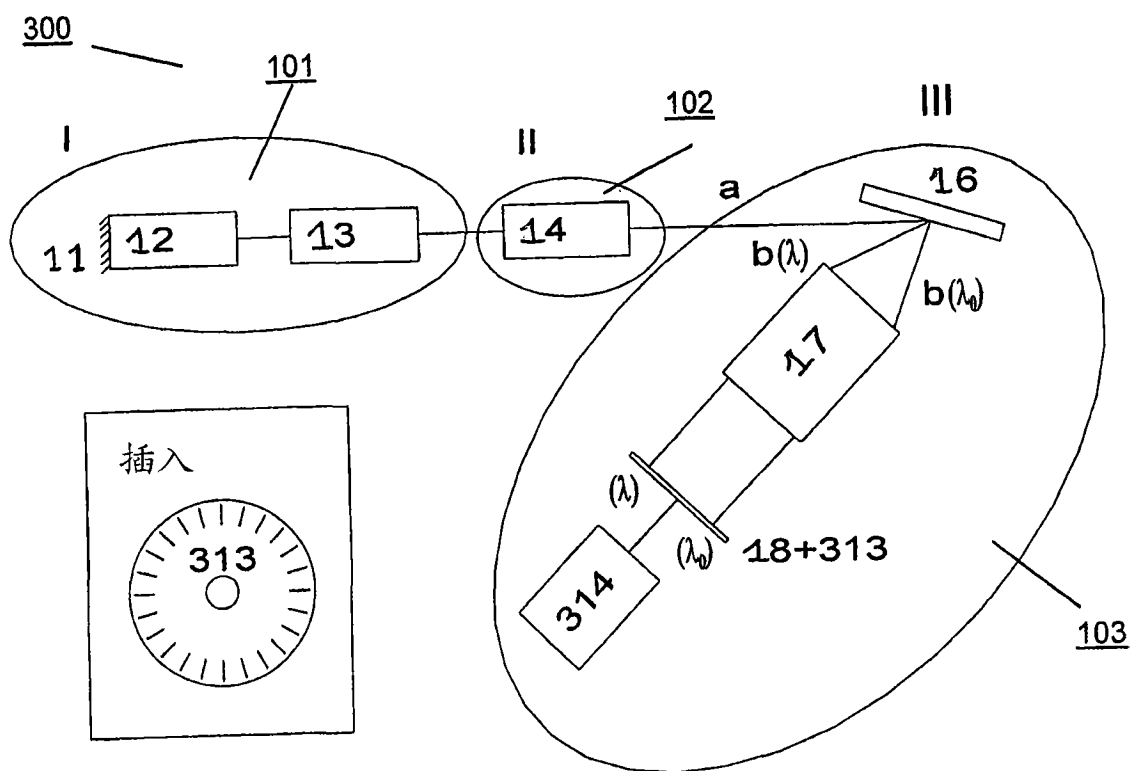


图 3

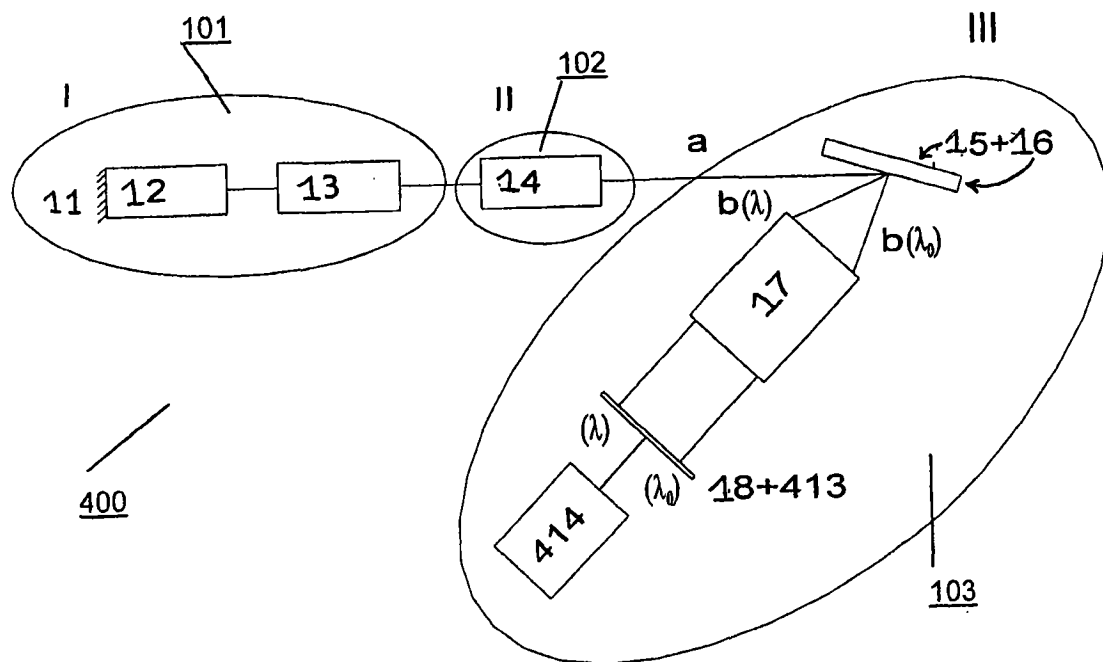


图 4

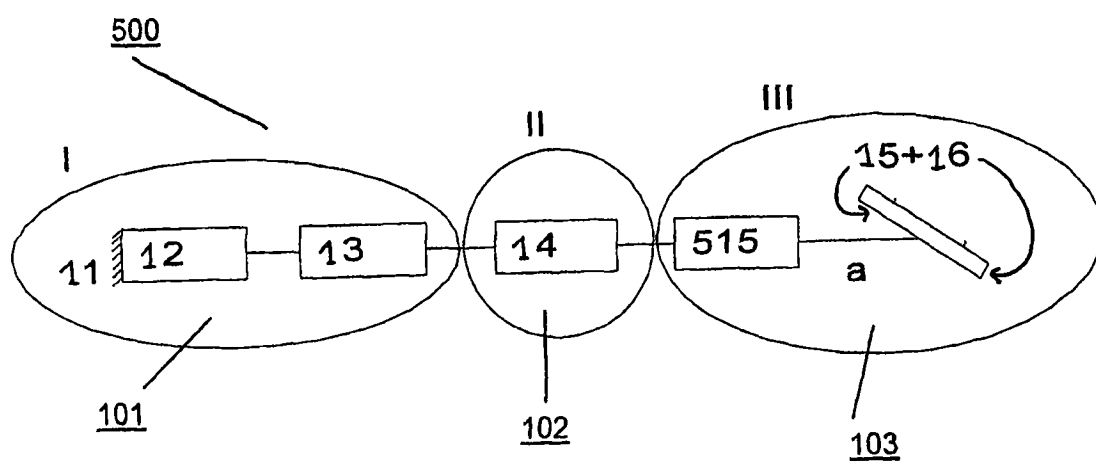


图 5

相干长度-扫描速度

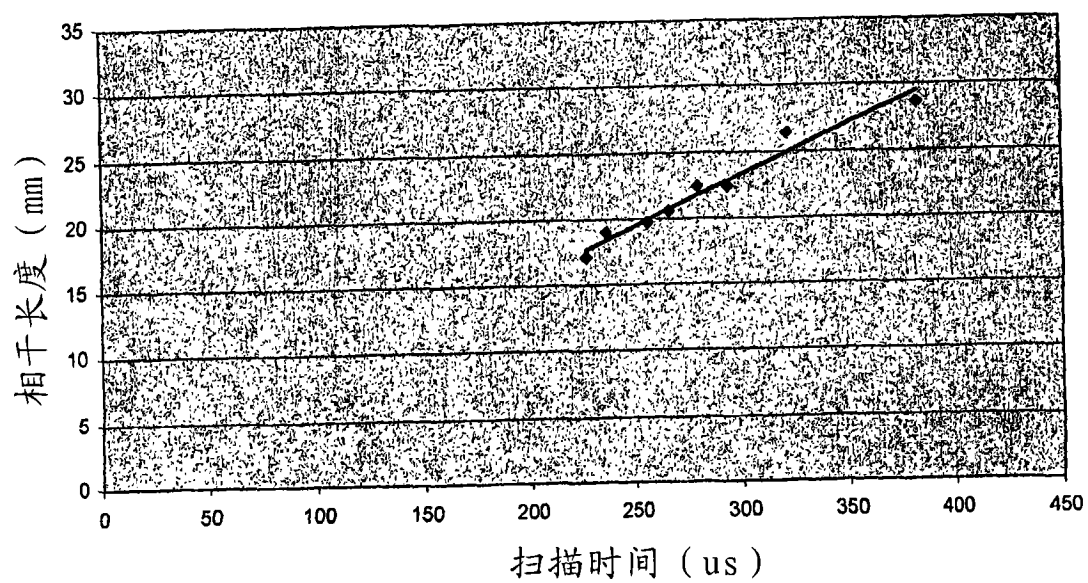


图 6

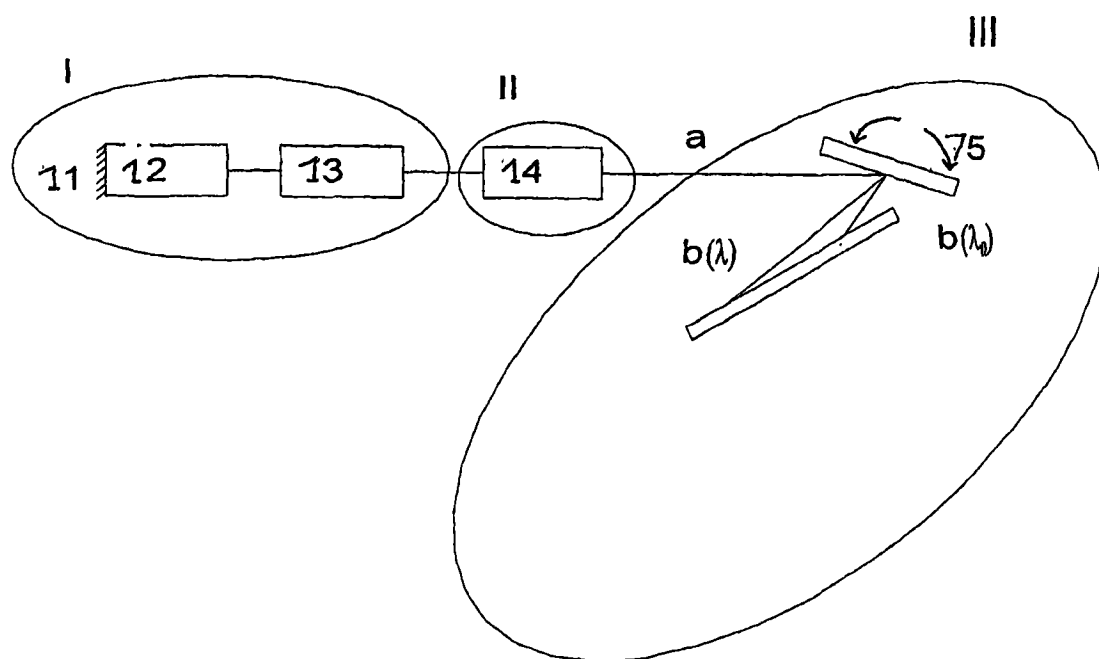


图 7

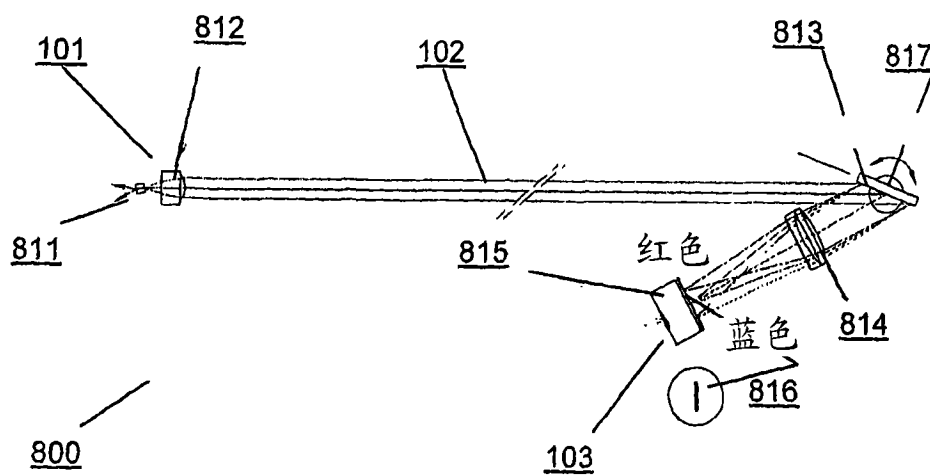


图 8

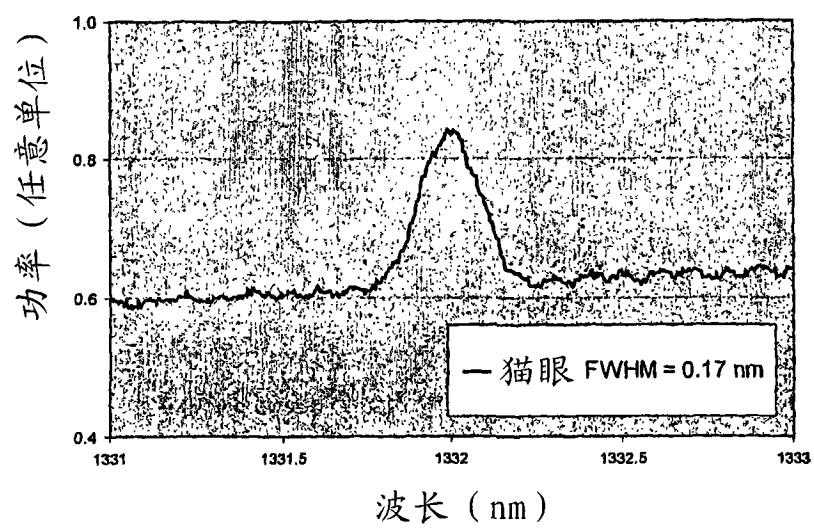


图 9

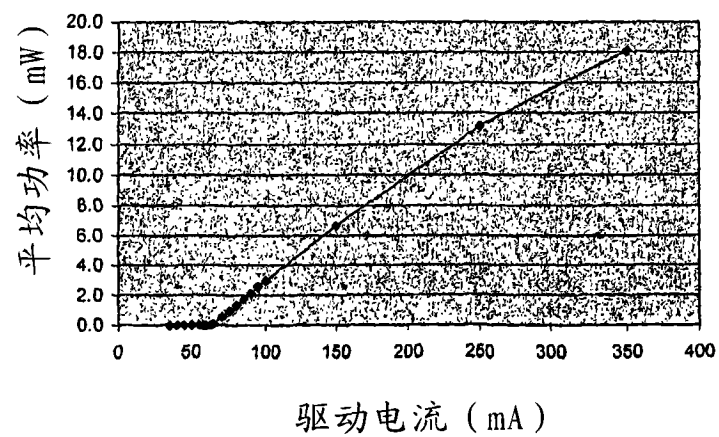


图 10

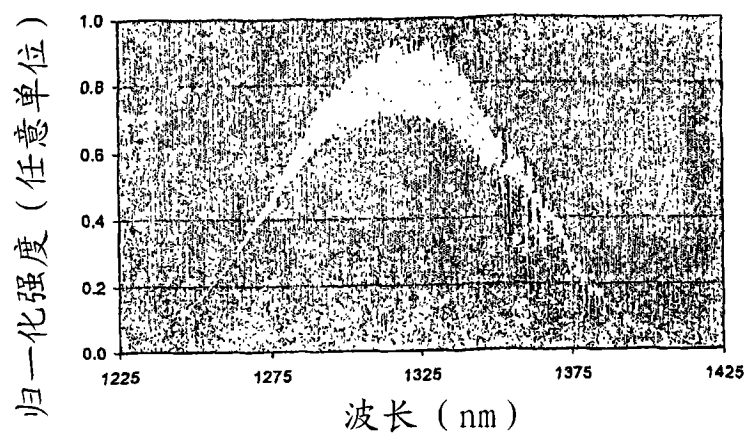


图 11

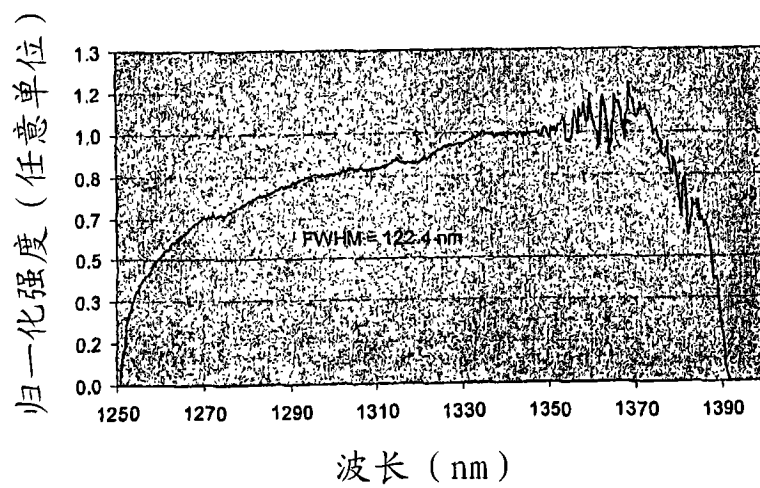


图 12