

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580032177.9

[43] 公开日 2007 年 10 月 10 日

[51] Int. Cl.
H01S 5/06 (2006.01)
G02F 1/35 (2006.01)

[11] 公开号 CN 101053130A

[22] 申请日 2005.9.23

[21] 申请号 200580032177.9

[30] 优先权

[32] 2004.9.24 [33] IT [31] FI2004A000199

[86] 国际申请 PCT/IT2005/000546 2005.9.23

[87] 国际公布 WO2006/033133 英 2006.3.30

[85] 进入国家阶段日期 2007.3.23

[71] 申请人 加布里埃莱·费拉里

地址 意大利佛罗伦萨

[72] 发明人 加布里埃莱·费拉里

[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 蒋世迅

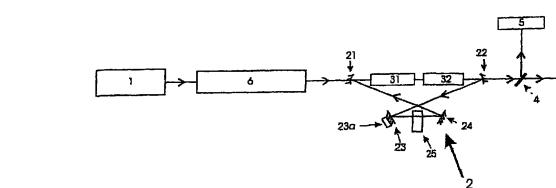
权利要求书 5 页 说明书 11 页 附图 1 页

[54] 发明名称

光频乘以因子 1.5 的方法和装置

[57] 摘要

按照本发明，光谐振腔(2)是与非线性光学装置(31, 32)和激光源(1)进行组合，为的是产生频率是初始激光源频率 F 的 1.5 倍的光辐射，即，波长是初始激光源波长的 2/3。光学腔(2)是由多个反射镜(121 – 124)构成，它对于频率 F/2 的光辐射有高的反射率，而对于频率 3/2 * F 的辐射有良好的透射率以提取最终的辐射，和按照该装置的配置，这些反射镜对于频率 F 的辐射有中等或高的反射率，或高的透射率。借助于作用到构成谐振腔的至少一个反射镜上，可以精确地调整该谐振腔的有效光程长。光学腔(2)至少包含两个非线性光学装置(31, 32)：至少一个光学装置在非线性转换 $F \leftrightarrow 2 * F/2$ 时满足相位匹配或准相位匹配条件，至少一个光学装置在非线性转换 $F + F/2 \leftrightarrow 3/2 * F$ 时满足相位匹配或准相位匹配条件。光谐振腔的长度及



1. 一种借助于非线性光学装置对具有频率 F 的泵激激光辐射进行倍频的方法，其特征是，通过因子为 2 的分频，从所述泵激辐射中产生振荡辐射，以及所述振荡辐射与所述泵激辐射求和以得到具有频率 $3/2*F$ 的输出辐射。

2. 按照权利要求 1 的方法，其中所述倍频是通过包含所述非线性光学装置的光谐振腔实现的，所述谐振腔的长度及其共振模是被有源稳定的，使所述谐振腔是作为退化 OPO 而稳定地运行，即，相同频率 $F/2$ 的两个光子是从频率 F 的一个光子中产生的。

3. 按照权利要求 2 的方法，其中所述谐振腔长度的稳定是借助于位移构成所述谐振腔的至少一个反射镜，该位移是沿至少一个频率 $F/2$ 的波长的行程，所述位移是受所述谐振腔的锁定系统的控制到在频率 $F/2$ 下的辐射，所述锁定系统包括：调制所述反射镜的位置和相位检测来自谐振腔的所述泵激辐射的透射幅度，或相位检测在 $3/2*F$ 下产生的辐射的幅度。

4. 按照权利要求 3 的方法，其中所述谐振腔被配置成工作在三重共振条件下，因此，泵激场泵激是与谐振腔模式之一发生共振。

5. 按照权利要求 4 的方法，其中调谐频率 $F/2$ 辐射累积的相位是与调谐频率 F 的相位分开进行的，这是借助于改变传输通过放置在所述谐振腔中光学元件的两种辐射的相对光程。

6. 按照权利要求 4 或 5 的方法，其中所述非线性光学装置包括：第一晶体和第二晶体，这两个晶体的侧面对于频率 F 和 $F/2$ 的辐射有抗反射涂层，所述第二晶体的输出面对于频率和 $F+F/2 \leftrightarrow 3/2*F$ 以及频率 $3/2*F$ 有抗反射涂层，通过位移，旋转或温度改变所述晶体中的至少一个晶体，由频率 $F/2$ 辐射累积的相位与由频率 F 的辐射累积的相位被分别调谐，并通过与检测元件相关的二向色反射镜，与耦合进入谐振腔的辐射 F，或在 $3/2*F$ 下产生的辐射，或在 $F/2$ 下产生的辐射的调谐进行同步测量，安排二向色反射镜使从所述谐振腔输出的辐射

入射到检测元件上。

7. 按照权利要求 6 的方法，其中在所述晶体的至少一个晶体中，二面角形成在输入侧面与输出侧面之间，所述至少一个二面角晶体相对于光束的光程发生横向位移，用于相位调谐。

8. 按照权利要求 7 的方法，其中两个所述晶体是二面角形状，它们是这样安排的，由一个晶体引入的频率 F 辐射与频率 $F/2$ 辐射之间的角间距至少部分地被另一个晶体补偿，并沿横向位移用于相位调谐。

9. 一种倍频器装置，包括频率 F 的泵激辐射的激光光源或与它相关，该倍频器装置包括：环形光谐振腔和安排在所述谐振腔中的非线性光学装置，该倍频器其特征是，所述光学装置包括：第一光学装置和第二光学装置，第一光学装置满足退化非线性转换 $F \leftrightarrow 2*F/2$ 的相位匹配或准相位匹配条件，而第二光学装置满足非线性转换 $F+F/2 \leftrightarrow 3/2*F$ 的相位匹配条件，所述谐振腔包括：四个反射镜，这些反射镜至少对于频率 $F/2$ 的辐射有高反射率，并适合于从所述谐振腔中提取频率 $3/2*F$ 的辐射，还提供用于有源稳定所述谐振腔长度及其共振模的稳定装置，使所述谐振腔被稳定地工作在退化条件下。

10. 按照权利要求 9 的装置，其中所述反射镜至少对于频率 $3/2*F$ 的辐射是透明的。

11. 按照权利要求 9 的装置，其中所述谐振腔包括：对频率 $3/2*F$ 的辐射是反射的和对其他波长是透明的波片。

12. 按照权利要求 9 至 11 中任何一个的装置，其中所述谐振腔包括：仅仅作用在频率 $F/2$ 辐射上的标准具装置。

13. 按照权利要求 9 至 12 中任何一个的装置，其中所述非线性光学装置包括：第一晶体和第二晶体，其侧面对于频率 F 和 $F/2$ 的辐射有抗反射涂层，所述第二晶体的输出侧面对于频率 $3/2*F$ 的辐射也有抗反射涂层。

14. 按照权利要求 13 的装置，其中所述非线性晶体是由周期极性 KTP(磷酸钛氧钾) PPKTP)，或周期极性 LiNbO₃(LN) PPLN)，

或 MgO: LiNbO₃ (掺氧化镁 LN) 制成，二者都是单晶型和周期极性。

15. 按照权利要求 13 或 14 的装置，其中所述稳定装置包括：至少一个换能器，用于支持所述谐振腔的所述反射镜之一，可以确保在频率 F/2 上至少一个波长的一个行程，所述换能器是被所述谐振腔的锁定系统控制在频率 F/2 上的辐射，所述锁定系统包括：相位检测装置，用于检测来自谐振腔的所述泵激辐射的透射幅度，或相位检测装置，用于检测在 3/2*F 上产生的辐射幅度。

16. 按照权利要求 15 的装置，其中所述谐振腔的所述反射镜对于频率 F 的辐射是高度透明的反射镜，使所述谐振腔被配置成在双共振条件下工作，所述锁定系统包括：与检测器元件相关的二向色反射镜，被安排成使从所述谐振腔输出的辐射入射到检测器元件。

17. 按照权利要求 15 的装置，其中所述谐振腔的所述反射镜对于频率 F 的辐射是有高反射率的反射镜，除了非耦合反射镜以外，其它反射镜的反射率是这样选取的，它可以使所述泵激辐射的阻抗耦合最大化，因此，所述谐振腔被配置成工作在三重共振条件下，所述锁定系统包括：检测元件，被安排成由所述谐振腔的非耦合反射镜反射的辐射入射到该检测元件。

18. 按照权利要求 17 的装置，其中在所述非耦合反射镜与所述检测元件之间还至少安排一个延迟波片和线性偏振装置。

19. 按照权利要求 17 或 18 的装置，其中所述谐振腔包括：偏振元件，例如，在布儒斯特角下的波片。

20. 按照权利要求 17 至 19 中任何一个的装置，其中所述谐振腔包括：光学元件，用于相对于频率 F 辐射的相位改变频率 F/2 辐射的相位。

21. 按照权利要求 17 至 20 中任何一个的装置，其中至少一个所述晶体是这样安装的，它可以沿光轴的正交方向平移，和/或围绕正交于光轴的轴旋转，用于相对于频率 F 辐射的相位改变频率 F/2 辐射的相位。

22. 按照权利要求 17 至 19 中任何一个的装置，其中至少一个

所述晶体是与改变温度的装置相关，用于相对于频率 F 辐射的相位改变频率 F/2 辐射的相位。

23. 按照权利要求 20 或 21 的装置，其中在至少一个所述晶体中，二面角形成在输入面与输出面之间，所述至少一个二面角晶体是这样安装的，它相对于光束的光程可以沿横向位移，用于相位调谐。

24. 按照权利要求 23 的装置，其中这两个所述晶体是二面角形状，并有这样的安排，一个晶体在频率 F 辐射与频率 F/2 辐射之间引入的角间距至少部分地被另一个晶体补偿。

25. 按照权利要求 24 的装置，其中所述晶体是由相同的材料制成，并分别有互相面对面的辐射输出面和辐射输入面，它们是按照相同和相干倾斜的二面角被切割的。

26. 按照权利要求 21 至 25 中任何一个的装置，其中所述至少一个晶体的运动是由压电换能器实施的。

27. 按照权利要求 21 至 26 中任何一个的装置，还包括：与检测器元件相关的二向色反射镜，它有这样的安排，从所述谐振腔输出的辐射入射到检测器元件，用于实施与耦合进入谐振腔的辐射 F，或在 $3/2*F$ 上产生的辐射，或在 $F/2$ 上产生的辐射调谐同步的测量。

28. 按照权利要求 15 至 27 中任何一个的装置，其中支持所述反射镜之一的所述至少一个换能器是压电换能器。

29. 一种在两个互相干光频场之间用于相对相位调整的方法，所述光频场是沿相同的光程传播，其特征是，在传输通过至少一个光学元件之后，所述调谐是在两个光场之间所述光程的相对变化基础上实施的。

30. 按照权利要求 29 的方法，其中所述至少一个光学元件是用于改变光学元件中光程的加上电压的电光晶体，或在所述频率下有抗反射涂层的波片，或非线性晶体。

31. 一种可以使两个互相关波长同时共振的光谐振腔，包括：光学元件，所述频率的两个光场的光程入射到该光学元件，因此，它可以按照权利要求 29 或 30 的方法工作。

32. 按照权利要求 31 的光谐振腔，该谐振腔与辐射及其二次谐波发生双重共振，它包含用于从基频到二次谐波的倍频晶体和用于基频与二次谐波求和以得到三次谐波的非线性晶体。

33. 按照权利要求 31 的光谐振腔，该谐振腔与辐射及其二次谐波发生双重共振，它包含用于从基频到二次谐波的倍频晶体和用于满足二次谐波倍频后产生四次谐波的相位匹配条件的非线性晶体。

光频乘以因子 1.5 的方法和装置

技术领域

本发明涉及激光光源和相对的光频转换系统的领域。具体地说，本发明涉及光频乘以因子 1.5 的方法和装置。

背景技术

在高精确度光谱术和激光冷却锂原子蒸汽的应用中，我们需要利用有以下理想技术规格的激光源：功率为几百毫瓦；低幅度噪声的连续波辐射（不是脉冲波）；在对应于原子共振波长（671 nm）附近有若干 GHz 的可调谐频率；相对于 6 MHz（6 MHz 是原子跃迁的自然线宽）有小的谱线宽度；单横模，可能是高斯模，其 M² 至少小于 1.5，它可以确保至少 50% 耦合效率进入单横模光纤；低成本；尽可能简单地操作；至少在几个月正常使用期间有稳定和可靠的效率；功率消耗不大于几千瓦。

在现有技术的各种可能性中，没有一个激光源能够完全满足上述的要求。考虑半导体激光源，我们知道激光二极管能够在 671 nm 附近工作，并能输出高达 5-10 W 的功率。这些高功率二极管的发射光谱有多个 THz 宽，而它们的空间光束分布显然是多模。为了满足光谱线宽和光束分布模式的准则，我们不得不求助于低功率激光二极管（最大功率为 20 mW），它可以稳定在 Littrow 或 Littman-Metcalf 配置的扩展谐振腔中。在这些配置中，最终得到的功率约为激光二极管的初始功率的 50%，而在这种具体的情况下，最终可得到的功率不大于 10 mW。一般地说，通过注入锁相从属激光二极管，或引晶半导体锥形放大器，可以放大具有良好光谱性质的低功率辐射（“A high-power multiple-frequency narrow-linewidth laser source based on a semiconductor tapered amplifier”，G. Ferrari et al., Optics Letters 24, 151, (1999)）。然而，在激光二极管用作从属放大器的具体情

况下，可能得到的功率不大于 20 mW，而且在当前市场上还没有波长小于 730 nm 的半导体锥形放大器。

理论上，染料激光器代表有使用灵活性的一种有效方案。通过改变所用染料的类型和泵激光束的波长，可以产生的辐射的发射波长是从红外到紫外。在 671 nm 辐射的具体情况下，利用市场上现有的系统可以产生这种辐射。例如，可以得到以若丹明作为染料的染料激光器 Coherent 699。利用这种组合，泵激光器的发射波长一定在 500 nm 与 550 nm 之间，因此，最普通的选择是氩离子 (Ar+) 激光器，或有倍频级的钕或镱 YAG 激光器 (515 nm 或 532 nm)。然而，在氩离子 (Ar+) 激光器的情况下，其效率是非常低 (约 0.1%)，产生的功率是在几瓦范围内，而我们需要消耗许多个千瓦的能量。此外，这些激光器不是非常可靠的，它们通常有不可忽略的幅度和指示噪声，并且在购买和维护上都是相当昂贵的，它要求频繁地重新调准谐振腔。由于这些原因，它们通常不能在工业上使用。使用 Ar+激光器作为泵激激光器的另一种方案是利用倍频的 Nd:YAG 或 Yb:YAG 激光器。这些激光器是可靠的 (通常，它们仅需要在每隔 10000 工作小时之后替换泵激二极管条)，且它们是十分有效的 (为了产生 10 W 的辐射，总体功率消耗通常是 1 kW，其中还考虑到 Nd/Yb:YAG 棒冷却系统)。于是，染料激光器满足输出功率，光谱纯度，和空间模式的准则。然而，它们代表一种昂贵的解决方案，且不满足操作简单性的准则。

另一种可能性是利用钛-蓝宝石 (Ti:Sa) 激光器。这种激光器有类似于 671 nm 染料激光器的光谱特性和工作条件，并有较好的操作简单性。然而，Ti:Sa 增益曲线的中心是在 850 nm 附近，而它们在 671 nm 下的应用不是高效率的 (在增益分布曲线的尾部)。此外，Ti:Sa 激光器的成本与染料激光器的成本相当。

由于在所需波长上没有直接发射的光源，并有可接受的价格和完全满意的操作方法，可以考虑依靠非线性频率转换的激光源，例如，二次谐波发生 (SHG)，频率求和，和 OPO。

二次谐波发生是一个允许辐射频率加倍的转换过程，其中通过发

送基本辐射到晶体上，这种晶体具有非线性偏振并同时满足基频辐射与 SHG 产生辐射之间的相位匹配条件（若使用周期极性晶体，则为准相位匹配条件）。当前，已经有很适合于在完全可见光谱，近 UV，和近 IR 下的二次谐波发生的非线性晶体。具体地说，现在已经有从 1342 nm 光中产生 671 nm 光的晶体。泵激光器在 1342 nm 下仍然至少可以输出 1W，并有诸如光谱纯度，频率可调谐性和空间模式质量的合适特性。半导体光源可以输出高达几十毫瓦的功率，而放大器（例如，拉曼光纤放大器）不适合于产生线宽小于 1 GHz 的辐射。一种可能的方案是钒酸钕激光器，但是这些放大器不能产生连续波（CW），且它们不满足频率可调谐性的准则。

频率求和相当于不同频率的两个独立光子进行求和的一个过程，为的是产生频率是这两个基本光子频率之和的单个光子。在 671 nm 的应用中，一种可能性是利用 1 μm 的激光器在 Yb 光纤放大器上被放大到 5W（如同在扩展谐振腔上被稳定的激光二极管）和 2 μm 激光器（在铥光纤放大器上被放大到 10W 的激光二极管）。于是，我们可以得到相当高的功率，但是为了实现高效率的非线性转换，需要利用有 1 μm 和 2 μm 辐射的双共振光谐振腔。这并不代表 1 μm 辐射有具体的问题，而是可能出现 2 μm 辐射的问题，因为在这个波长上缺乏有效的检测器（用于光学对准，并使该辐射与谐振腔模式之一发生共振）。此外，这个解决方案要求被求和的两个激光器满足光谱纯度，功率，空间模式质量的要求，它意味着增加激光源的复杂性。

OPO（光参量振荡器）是这样一种装置，它是从频率 f_1 的激光场开始产生频率 f_2 和 f_3 的两个激光场，其中 $f_2+f_3=f_1$ 。OPO 基本上是由包含非线性晶体的光谐振腔构成，它满足过程 $f_1 \leftrightarrow f_2+f_3$ 的相位匹配或准相位匹配条件。以频率 f_1 起动激光被称之为“泵激”；若频率 f_2 高于 f_3 ，则 f_2 被称之为“信号”，而 f_3 被称之为“空闲”。若光谐振腔是与一个光场（信号或空闲）共振，则 OPO 被称之为单共振；若它与信号和空闲都发生共振，则 OPO 被称之为双共振；若泵激也发生共振，则 OPO 被称之为三重共振。利用 OPO 产生 671 nm 辐射的

最简单方法是，从频率高于 $c/671 \text{ nm} = 446 \text{ THz}$ 的泵激开始，从而直接产生 671 nm。我们假设从 532 nm 的泵激开始，则与 671 nm 一起可以产生 2568 nm 的辐射。

从实际观点考虑，这种 OPO 是单共振的，其泵激功率的工作阈值是在 2-3W 之间（“Continuous-wave singly-resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO³”，Bosenberg et al., Optics Letters 21, 713 (1996)）。如此产生的辐射的光谱特性与实验条件十分有关，然而考虑到它满足上述的一些要求是实际的，利用 532 nm 的 10W 泵激可以产生 671 nm 的 100 mW 辐射。显而易见，在任何的情况下，我们需要采用强大的 532 nm 激光器，为此需要付出相应的成本。考虑到从这些系统得到的功率，本征频率的不稳定性（它与谐振腔，晶体，和泵激激光器的稳定性有关），和总体成本，即使这个解决方案不是令人满意的，但考虑到所有的要求，它至少适合于实际的工业应用。

最后，上述 OPO 的变型是 OPO 与其他非线性过程的组合，例如，频率求和或二次谐波发生。这种方法的目的是组合 OPO 产生的波长灵活性与振荡场的频率复制过程，或频率求和与泵激场（“Frequency up conversion by phase-matched sum-frequency generation in an optical parametric generator”，E.C. Cheung et al., Optics Letters, 19, 1967 (1994)）。尽管具有产生较高频率辐射的优点，但是这些系统给出的特征类似于标准 OPO 的特征。所以，我们也不能认为这种解决方案在 671 nm 应用中是令人满意的。

发明内容

本发明的目的是提供一种产生激光辐射的方法和装置，其波长是当前很难实现的波长，具体地说，它不限于接近原子锂 (671 nm) 的光跃迁，与此同时，满足所有上述的要求。

本发明的具体目的是提供一种上述类型的方法和装置，它能够获得这样高的工作效率，允许使用相对廉价的激光源以实现所需功率和总体输出光谱性质。

按照本发明，实现这些目的是利用光频乘以因子 1.5 的方法和装置，其重要的特征分别是由所附权利要求书的第 1 项和第 9 项限定。

按照本发明，光谐振腔是与非线性装置和激光源进行组合，为的是产生频率为 1.5 倍初始激光源频率 F 的光辐射，即，其波长是初始激光源波长的 $2/3$ 。光谐振腔包含对频率 $F/2$ 的光辐射有高反射率的反射镜，和对频率 $3/2 \cdot F$ 的光辐射有良好透射率的反射镜，用于提取最终的辐射，而按照本发明装置的配置，在频率 F 的辐射下，这些反射镜有中等或高反射率，或高透射率。谐振腔的有效光程长是精确地可被调整的，其中通过对构成谐振腔的至少一个反射镜进行调整。光谐振腔至少包含两个非线性光学装置：至少一个光学装置满足非线性转换 $F \leftrightarrow 2 \cdot F/2$ 的相位匹配条件，至少一个光学装置满足非线性转换 $F+F/2 \leftrightarrow 3/2 \cdot F$ 的相位匹配条件。光谐振腔的长度及其共振模是被有源稳定的，因此，唯一的分频过程是除以因子 2 的分频过程。

非线性晶体满足相位匹配类型 I，相位匹配类型 II，或准相位匹配，其中泵激激光频率除以因子 2。在相位匹配类型 I 或准相位匹配的情况下，产生两个有相同偏振的光子，即，两个相同的光子。这个过程称之为退化分频（例如，参阅“Continuous-wave optical parametric oscillator based on periodically poled KTiOPO₄”，A. Garashi et al., Optics Letters, 23, 1739 (1998)）。

在退化的情况下，该装置实际上是至少双共振的 OPO（相同的信号和空闲），它可以减小工作阈值到几十毫瓦。因此，相对于普通的 OPO，其效率自动地加倍，因为对于泵激激光中每个被变换的光子，产生最终频率的两个光子，而不是一个信号和一个空闲。于是，增益是双倍，并可以相应地减小 OPO 的工作阈值。

于是，在退化下工作时，OPO 的效率就提高，从而增大在频率 $F/2$ 下产生的功率，和相应地，泵激激光的功率消耗是更强了。在退化 OPO 中，在理论上，可以把高达 100% 的泵激初始功率转换成频率 $F/2$ 的辐射。按照本发明，在这种配置中，在从工作条件变化中导出的信号基础上，OPO 是工作在退化状态。除了在频率 $F/2$ 下的共振以

外，光谐振腔还可以在泵激频率 F 下共振（三重共振 OPO）。

附图说明

通过以下对本发明实施例的描述，这些实施例是作为非限制性例子，并参照附图，按照本发明方法和装置的其他特征和/或优点是显而易见的，其中：

图 1 代表按照本发明第一个实施例装置的典型配置图；

图 2 代表按照本发明第二个实施例装置的典型配置图；和

图 3 代表按照本发明第三个实施例装置的典型配置图，它与图 2 中的实施例装置有部分的不同。

具体实施方式

参照图 1，按照本发明利用泵激激光器 1 发射波长为 1006.5 nm 的辐射，它对应于频率 F 为 297 THz，其中假设需要产生的输出辐射是波长 671 nm。在这个光谱区中，可以有适合于输出高达 100 mW 的二极管激光器，和输出高达 5W 的光纤放大器。因此，组合这两种光源，可以得到有理想光谱特性的 1006.5 nm 的 5W 辐射。

实际的光倍频装置包括：由四个反射镜 21-24 构成的环行光谐振腔 2，它对于 2013 nm（或，更一般地说，频率 F/2）的辐射有高的反射率，而对于 1006.5 nm 和 671 nm（即，分别是频率 F 和 3/2*F）的辐射是高度透明的。频率 3/2*F 辐射的高度透明是从谐振腔中提取所需辐射的必要条件。在谐振腔中插入二向色反射镜，该反射镜对于频率 3/2*F 的辐射是反射的而对于其他波长是透明的，可以得到类似的结果。在传输通过以块 6 表示的已知类型的波束整形光学元件之后，光源 1 发射的泵激辐射入射到谐振腔的第一个反射镜 21（泵激非耦合反射镜）上。

至少一个反射镜，如图中数字 23 所示，安装在压电换能器 23a 上，可以确保在频率 F/2 下至少一个波长的一个行程在时标上是足够短，以补偿谐振腔上的声噪声。两个非线性晶体 31, 32 放置在谐振腔内，但不是必需的，它们通常接近于谐振腔共振模的最大聚焦点。

第一个晶体 31 满足过程 $1006.5 \leftrightarrow 2*2013$ nm 的相位匹配或准相

位匹配条件，第二个晶体 32 满足过程 $2013+1006.5 \leftrightarrow 671 \text{ nm}$ 的相位匹配或准相位匹配条件。这两个晶体的所有侧面对于 1006.5 nm 和 2013 nm 都有抗反射涂层。晶体 32 的输出面对于 671 nm 也有抗反射涂层。非线性晶体是由周期极性 KTP (磷酸钛氧钾) (PPKTP)，或周期极性 LiNbO_3 (LN) (PPLN)，或 $\text{MgO}: \text{LiNbO}_3$ (掺氧化镁 LN) 制成，二者都是单晶型和周期极性。利用这些晶体，可以满足这两种非线性过程的准相位匹配条件，而在涉及频率转换过程中的所有三个波长上，它们都有很好的透射率，另一个优点是，所有光场的偏振方向是自动地线性和平行的。

通过作用到夹持反射镜 23 的压电换能器 23a 上，光谐振腔的长度是有源稳定的，因此，该谐振腔是恒定地工作在退化条件下。可以验证退化工作条件，例如，可以检查泵激通过谐振腔的透射率。事实上，当谐振腔是在退化状态时，OPO 的阈值较低和泵激消耗较高。通过引入小的调制到被压电换能器控制的反射镜 23 的位置，并对 OPO 泵激传输进行相位测量，可以得到压电换能器的校正信号，从而使谐振腔的长度保持恒定。从输出通过与光电检测器 5 相关的二向色反射镜 4 的辐射中，可以得到从其透射信号(在这个具体的情况下是 1006.5 nm) 中导出的谐振腔锁定信号。另一种方案是，可以检查在 671 nm 或 2013 nm 产生的辐射是否为单纵模。

现在参照图 2，其中类似于以上实施例的元件是用对应的参考数字标记，光谐振腔 102 可以配置成 OPO 是三重共振。为此目的，与以上实施例相同的两个晶体 131, 132 放置在反射镜 121-124 之间，其中反射镜 121 是泵激的非耦合反射镜，而在 2013 nm 下有高的反射率，它在 1006.5 nm 下给出的反射率可以使泵激光束耦合进入谐振腔的阻抗耦合最大化。其他的三个反射镜是在 1006.5 nm 和 2013 nm 下都有高反射率，而在 671 nm 下是透明的。

为了稳定与泵激共振的谐振腔，可以利用锁定方案，例如，Haensch-Couillaud 锁定方案 (B. Couillaud and T.W. Haensch, Opt. Comm. Vol 35, 441(1981))，或 Pound-Drever-Hall 锁定方案 (R.W.P.

Drever et al., App. Phys. B Vol 31, 97(1983)). 在 Haensch-Couillaud 锁定方案的情况下, 如图所示, 谐振腔在 1006.5 nm 下泵激共振时的稳定是通过作用到反射镜 123 的压电换能器 123a 上实现的。通过分析非耦合反射镜 121 反射的泵激光束的偏振, 可以得到锁定信号, 该泵激光束通过延迟波片 107 (在 1006.5 nm 下的 $1/2*\lambda$ 和 $1/4*\lambda$, 即, 在泵激波长), 线性偏振器 108, 和微分光电检测器 105。若进入谐振腔的损耗与偏振有关, 则被反射镜 121 反射进入检测器 105 的辐射偏振取决于泵激相对于谐振腔共振模的频率差。因此, 用于偏振分析的系统可以提供一个适合于保持谐振腔与泵激场稳定共振的信号。

为了使偏振方向与谐振腔的损耗有关, 可以在谐振腔中插入一个偏振元件 (如布儒斯特角的波片)。另一种方案是, 可以利用被非线性晶体引入的损耗, 该损耗仅发生在满足相位匹配转换条件的偏振方向上。这可以减小插入到谐振腔的光学元件数目, 和消除由于偏振元件造成的附加损耗。的确, 偏振元件可以理想地作用泵激光束而没有对 2013 nm 的辐射引入损耗是不可能的。

在与泵激激光共振时稳定谐振腔不能确保建立 OPO 的退化条件。因此, 需要分开地调谐 2013 nm 的光场在进入谐振腔的一个往返行程中累积的相位。这种调谐可以通过对温度, 校准, 或晶体 131 或 132 的长度的作用而完成, 只要它不影响整体的转换效率。或者, 可以在谐振腔中添加光学元件, 如图 2 中的光学元件 126, 该元件可以改变 2013 nm 光场相对于 1006.5 nm 光场的相位。这种光学元件可以是加上合适电压的电光晶体, 或在两个共振波长上有抗反射涂层的波片, 通过对波片的不同入射角或厚度的作用, 可以改变两个光场的相对光程。

按照另一种改变两个共振光场在谐振腔的往返行程上累积相位的方法, 如图 3 所示 (其中类似于以上附图中的元件是用对应的参考数字标记), 可以利用非线性晶体 231 和 232, 它们不是通常被切割成有平行的输入面和输出面, 而是在输入面与输出面之间形成二面角。通过沿相对于光束轴的垂直方向 (横向) 至少位移一个晶体, 如箭头

A 所示，在光束通过的位置上晶体的厚度发生变化，从而相应地改变两个光场在一个谐振腔的往返行程上的相对相位。

非线性晶体的输入面与输出面之间的二面角通常造成泵激光束 F 相对于在频率 $F/2$ 上的振荡光束 (generated beam) 有相对偏差，从而可以降低三重谐振腔的效率。为了补偿被二面角形状的非线性晶体引入的这个角间距，最好是，两个非线性晶体被切割成在输入面与输出面之间形成二面角，且这两个非线性晶体是这样安排的，第一个晶体引入的角间距可以被第二个晶体补偿（或部分地补偿）。例如，一种可能性是选取由相同材料制成的两个非线性晶体 231 和 232，其中有面对面的两个侧面，即，输出面和输入面，它们是按照相同和相干倾斜的二面角被切割的，如图 3 所示。

通过常规的机械系统作粗略运动，可以得到该晶体的横向位移，而利用压电换能器 231a 和 232a 得到精确的运动。在频率 F 和 $F/2$ 下的光场相位是通过作用到例如压电换能器 231a 和 232a 上被有源地稳定，从而在至少一个晶体的横向位置上引入调制，并借助于二向色反射镜 204 经合适的检测器 205 实施同步测量耦合进入谐振腔的泵激辐射 F，或同步测量在频率 $3/2 \cdot F$ 下产生的辐射，或同步测量在频率 $F/2$ 下产生的辐射。

两个共振场的相对相位稳定的方法是借助于按照上述二面角的晶体切割，它对于可能是非二面角晶体也是有效的，其中仅仅代替横向的位移，这种晶体经受复合的运动，该运动组合与光轴正交方向的平移和围绕与光轴正交方向的轴的转动。事实上，按照这种方法，也可以得到两个光场通过晶体之后的光程变化。

在任何的情况下，按照上述图 1 中的实施例，通过监测泵激通过谐振腔的透射率，或监测在 671 nm 或 2013 nm 下产生的辐射是否为单纵模，可以检查退化工作条件。

两个互相干光场之间的相对相位变化，例如，一个光场是在频率 F 和另一个光场是在频率 $F/2$ ，或相当地，一个光场是在频率 F 和另一个光场是在频率 $2 \cdot F$ ，按照以上的描述，可以更普遍地应用在非线

性光辐射产生的所有过程中，其中转换效率也取决于谐振腔的使用。例如，一个典型的例子是连续波激光在频率 F 下的三倍频过程 ($2*F+F$) 或四倍频过程 ($2*2*F$)。

利用连续波激光器，二倍频过程是在谐振腔中实现的，为的是保持有高的转换效率数值。在三倍频的情况下，一种可能性是在谐振腔中插入两个级联的非线性晶体：第一个晶体专门用于基本光场的二倍频过程 ($F+F \leftrightarrow 2*F$)，而第二个晶体专门用于基本光场与其二次谐波的求和过程 ($F+2*F \leftrightarrow 3*F$)。在四倍频的情况下，可以在谐振腔中插入两个级联的非线性晶体：第一个晶体专门用于基本光场的二倍频过程 ($F+F \leftrightarrow 2*F$)，而第二个晶体专门用于由第一个晶体产生的二次谐波的二倍频过程 ($2*F+2*F \leftrightarrow 4*F$)。为了使整个过程有高的效率，我们要求基本光场（频率 F ）和二次谐波光场（频率 $2*F$ ）都是很强的光场。有利的是，使这两个光场在光谐振腔中同时发生共振。

在利用类型 I 晶体的二倍频情况下，合理的是，包含非线性晶体的光谐振腔是与基本光场和二次谐波光场同时共振的，但是，一般地说，这是不可能发生的。此外，若在相同的二倍频谐振腔中插入第二个晶体（用于二次谐波的二倍频，或基本光场与二次谐波光场之和），则第二个晶体的色散通常阻碍谐振腔与基本光场和二次谐波光场的同时共振。因此，连续波辐射的四倍频过程是借助于级联两个二倍频器实现的，每个二倍频器是由包含特定非线性晶体的谐振腔构成。

类似的考虑可应用于三倍频过程。若在二倍频的谐振腔 ($F+F \leftrightarrow 2*F$) 中添加一个元件，用于控制基本光场和二次谐波光场之间的相对相位，则可以按照如下步骤进行：

- 在相同的谐振腔中再引入一个专门用于四倍频或三倍频的非线性晶体，在该谐振腔中可以从这样的光场开始 ($2*F+2*F \leftrightarrow 4*F$ 或 $F+2*F \leftrightarrow 3*F$)；

- 选取谐振腔的反射镜，使该谐振腔与基本光场和二次谐波光场发生共振；

- 稳定谐振腔的长度，使它与基本辐射发生共振，或稳定泵激激

光，使它与谐振腔模式之一发生共振；

-稳定这两个光场之间的相对相位，使该谐振腔是与基本光场和二次谐波光场同时共振。这种方法可以产生三倍或四倍于初始光场频率的光场，其中仅仅采用一个光谐振腔，从而简化用于此目的的设备。

再次考虑涉及频率乘以因子 1.5 的方法和装置，三重共振配置相对于双重共振配置有以下一些优点。泵激阈值可以低至 1mW，因而，整体效率可以较高。此外，在晶体上的泵激强度较高，从而导致较高的非线性转换效率。最后，锁定谐振腔到泵激激光可以避免泵激传输通过谐振腔之后的小幅度调制（它在双重共振配置中对于谐振腔的稳定是必要的），从而降低整体的幅度噪声。

为了提高产生的辐射的光谱特性，在谐振腔中添加图中所示薄的标准具可能是有用的，在以上的三个实施例中，标准具分别是用数字 25, 125, 225 表示，仅仅作用到 2013 nm 的辐射（在三重共振的情况下，合适地选择表面处理，使它在 2013 nm 下是反射的，而在 1006.5 nm 下是抗反射的），可以确保 OPO 即使在高泵激强度下也是单模工作。

根据以上的讨论可以清楚地知道，按照本发明的方法和装置可以完全实现所有最初提出的目标。利用本发明，可以在很难实现的光谱区产生激光辐射，具体是，但不限于，671 nm，从而满足所有以下的要求：利用简单操作其光谱性质的激光光源；有小幅度噪声的连续波辐射；可调谐的频率范围超过几个 GHz；光谱宽度小于 6 MHz；M2 小于 1.5 的单横模；至少在几个月的工作期间有稳定和可靠的输出；功率消耗是在 1kW 的范围内。以上的装置有相对基本的结构，简单的操作，和有限的成本。

除了可以在很难实现的波长上产生激光辐射的应用以外，本发明还在光频计量方面有新的应用，因为它允许按照相位相干方式在光谱的不同和远距离区域之间建立联系。这可以在光频测量以及光频计数器的相位稳定方面有直接的应用。

在不偏离本发明的保护范围内，可以对按照本发明光频乘以因子 1.5 的方法和装置进行变化和/或改动。

