

文章编号: 1001-3806(2003)02-0116-03

纳秒光参量振荡器的综述

李朝阳 黄 骞 蔡 山

(北京工业大学应用数理学院, 北京, 100022)

摘要: 结合最新纳秒光参量振荡器(OPOs)的相关文献对纳秒级光参量振荡器的工作特性进行了细致描述,就光参量振荡器的几个重要指标分别进行了探讨,给出了几种新型非线性光学晶体的技术参数,并讨论了其相应的优缺点,最后阐述了纳秒光参量振荡器可能的发展前景。

关键词: 纳秒光参量振荡器; 非线性光学晶体; OPOs

中图分类号: TN248; O437 文献标识码: A

Review of nanosecond optical parametric oscillators

Li Chaoyang, Huang Liu, Cai Shan

(School of Applied Mathematics and Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

Abstract: A detailed description about working properties of nanosecond optical parametric oscillators(OPO) is given. The main characteristics of nanosecond OPOs are illuminated. Several novel nonlinear crystals are shown and their properties are also discussed. At last a brief look forward of nanosecond OPOs is presented.

Key words: nanosecond optical parametric oscillators; nonlinear crystals; OPOs

引 言

光参量振荡器(OPO)是获得全固态宽频带可调谐相干光源的重要方法之一,从1965年第1次在实验上实现光参量振荡以来^[1],OPO就一直是激光研究中的一个热点。在OPO众多不同的运转方式中(连续波、纳秒、皮秒和飞秒OPO),纳秒OPO的发展最为成熟,同时也是最为重要的一类OPO。这是因为激光调Q技术的成熟使获得持续时间10ns~20ns、单脉冲能量几百毫焦、峰值功率达到兆瓦量级的泵浦光甚为容易,从而保证了泵光在非线性晶体中的高增益要求;其次,纳秒OPO对谐振腔型的要求也不十分严格,可以经受高损耗、非严格的模式匹配,这使得光参量效应很容易发生;还有,在纳秒OPO中泵光与信号光之间的转化效率也是比较高的,以BBO晶体为例,有些商品的转化效率已经超过了30%^[2]。

简要阐述了光参量振荡器的工作原理,分析了纳秒光参量振荡器相对于其它光参量振荡器而言独特的技术特点,并结合国内外纳秒级光参量振荡器

的最新研究结果,对纳秒光参量振荡器可能的发展前景做了简要介绍。

1 OPO的基本原理和相位匹配方式

光参量振荡的物理基础源于非线性光学的二阶非线性效应,当一束频率为 ω_p 的泵浦光与频率为 ω_s 的信号光同时入射到非线性晶体后,在满足一定的相位匹配的情形下,就会在晶体中产生一束频率为 ω_i 的闲频光波,由能量守恒条件可以得到光参量效应的频率条件:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

根据动量守恒条件,在相位匹配时,可以得到光参量效应的波矢条件:

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (2)$$

如果把非线性晶体放在谐振腔中,当参量放大的增益大于腔内损耗时,就会在谐振腔的输出端获得信号光与闲频光持续的相干光输出,这就是光参量振荡器。由于:

$$k_i = \omega_i n_i / c \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

代入波矢条件(2)式中,经整理得到:

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i \quad (4)$$

由上式可见,信号光和闲频光的频率依赖于泵浦光的折射率,利用非线性光学晶体的双折射和色散特性,改变泵浦光折射率 n_p 并使以上相位匹配条件得到满足,就可以实现纳秒OPO的频率调谐。

按照入射泵光的偏振态,可将相位匹配方式分

作者简介: 李朝阳,男,1973年12月出生。博士研究生。现从事非线性光学和激光超短脉冲领域的研究工作。

收稿日期: 2002-05-20; 收到修改稿日期: 2002-08-15

为两类。在第 iv 类中, 信号光和闲频光的偏振方向相同, 而泵光的偏振态与它们垂直, 这种匹配方式的典型例子是 LiNiO_3 晶体 OPO^[3]。

图 1 给出了该晶体在 1064nm 泵光作用时的调谐曲线, 从图中可以看出, 该 OPO 可获得 $1.45\mu\text{m} \sim 4.1\mu\text{m}$ 的调谐激光输出, 同时, 简并点 ($2.13\mu\text{m}$) 调谐曲线有明显的转折, LiNiO_3 的这一特征是导致信号光在该点的线宽增大的主要原因(例如当 λ 为 $1.54\mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 1\text{nm}$; 当 λ 为 $2.13\mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 10\text{nm}$)。

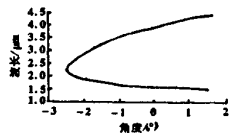


图 1 LiNiO_3 晶体 iv 类匹配在 $1.064\mu\text{m}$ 泵浦时的角度调谐曲线

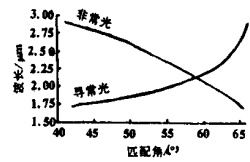


图 2 KTP 晶体 iA 类匹配在 $1.064\mu\text{m}$ 泵浦时的角度调谐曲线

另一类相位匹配方式通常称作非线性晶体的 iA 类匹配, 具体实现是使泵光和信号光的偏振方向相同, 而与闲频光的偏振方向相反。iA 类匹配又可以分为 iA 和 iB 两类匹配方式,

其中 iA 中泵光和信号光的偏振方向相同, iB 中泵光和闲频光的偏振方向相同。iA 类匹配的典型例子是 KTP 晶体 OPO^[4], 当用 1064nm 的泵光泵浦时, 其调谐曲线如图 2 所示, 由图可以看出, KTP 的调谐曲线由在简并点相互交叉的两分支构成, 可获得的调谐范围是 $1.57\mu\text{m} \sim 3.39\mu\text{m}$ 。与 iv 类匹配相比, iA 类匹配中输出线宽受调谐波长的影响较小, 这是由于在信号光和闲频光二者之间一个是非寻常光而另一个是寻常光的缘故。

2 纳秒光参量振荡器的特性

众所周知, 非线性耦合效率随着外加场强的增大而增加, 一般调 Q 固体激光器的脉冲峰值功率可以达到几十兆瓦, 它可轻松地超过 OPO 的振荡阈值使之起振, 因此, 对于 OPO 来说, 采用脉冲泵浦方式比连续波泵浦方式更容易激发参量效应。

纳秒 OPO 具有几个明显的优点。例如, 纳秒 OPO 对腔型的要求不很严格, 即便采用平平腔结构, 纳秒 OPO 也可以获得足够大的增益使之成为稳定腔; 其次泵浦光的空间模式不须优化也能保证光参量效应发生; 纳秒 OPO 可以采用单谐振和双谐振两种工作方式, 故可以视具体应用确定纳秒 OPO 的工作方式; 纳秒 OPO 对腔内损耗不敏感, 晶体本身可以吸收信号光或闲频光; 非线性晶体无需同谐振腔完全准直, 这就可以在一定的匹配角度范围内调

节非线性晶体, 获得 OPO 的全范围调谐; 此外, 在纳秒 OPO 谐振腔中还可引入光栅、标准具等光学元件来改善输出信号光的光束质量。

纳秒 OPO 也有一些缺点: (1) 由于泵浦光与非线性晶体的作用时间限制在纳秒量级内, OPO 工作在瞬时状态, 所以纳秒 OPO 没有足够的时间达到静态平衡, 为使 OPO 的转换效率最大, 存在一个最佳泵浦持续时间, 这就对泵浦光提出了较高的要求^[5]; (2) 纳秒 OPO 的泵光脉冲峰值功率很大, 可能会造成腔镜的镀膜和非线性晶体的损坏; 此外, 纳秒 OPO 信号光的输出频率线宽很大(通常有几个纳米), 这是在光谱学应用中应该尽力避免的问题, 现在如何压窄 OPO 的输出线宽是纳秒 OPO 中的一个很重要的研究课题。

3 新型非线性光学晶体的研制, 纳秒 OPO 的实用化

至今已在几十种非线性晶体中实现了光参量效应, 但考虑到 OPO 的实用性, 找到综合性能优异的非线性晶体并不是一件容易的事, 比如说, 有些晶体具有较高的非线性系数, 满足 OPO 的高转换效率的要求, 但没有大的双折射, 不能实现 OPO 宽调谐的相位匹配条件, 有些晶体的抗损伤阈值很低, 也不能适应纳秒 OPO 的高功率要求, 凡此种种都限制了纳秒 OPO 的研究应用和商业开发。从光学参量振荡器的发展也可以看出, 光学参量振荡器与非线性晶体的发展有着密不可分的关系, 研制出具有宽的透光光谱范围、大的非线性系数、高的损伤阈值、物化性能稳定且能实现大尺寸生长的新型非线性光学晶体一直是 OPO 研究的一大热点。

早期的纳秒 OPO 中所采用的非线性晶体主要有 KDP, LiNbO_3 及 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (BNN) 等, 这些材料普遍存在破坏阈值低、物化性质不稳定、非线性系数小等缺点, 所以早期的纳秒 OPO 主要用于科研, 很少有实用化的产品报道。

1985 年, 由我国福建物构所发明的 BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) 晶体是迄今为止可用于紫外波段的最优良的非线性晶体之一, 它大大加快了 OPO 的实用化进程。BBO 属于三角空间群, 光学透明区为 $0.19\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$, 其双折射很大, 有效非线性系数 (SHG) 大约是 KDP 的 6 倍, 并且折射率受温度影响小, BBO 的最大优点是光损伤阈值很高, 这对于获得大功率的可调谐激光器是极其有利的。1989 年, 该所又成功研制出 LBO (LiB_3O_5) 晶体, 它的非线性系数比

BBO 小,但其光学透明区与角度匹配范围更宽,光损伤阈值也比 BBO 高,并且 LBO 允许大的接收角,走离角小。1992 年,报道了 LBO 晶体做参量晶体的纳秒 OPO^[6],证实其在高功率可调谐激光器方面较 BBO 晶体更为优越。

1995 年,日本的 Mori 等人研制出新型非线性晶体 CLBO ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$),它将 OPO 的可调谐范围向远紫外波段进一步扩展,其综合性能也较好。CLBO 晶体属于四方晶系,是负单轴晶体,其稳定性好,不易潮解,透光范围是 180nm~2750nm,该晶体主要用于 OPO 的远紫外波段,也可以用于 Nd:YAG, YLF 和玻璃激光器的 4 次谐波产生(iv 类相位匹配情况下)。同 BBO 晶体相比,CLBO 的有效非线性系数较小,但是 CLBO 的走离角更小,具有更大的光谱接受范围和更宽的角度接受带宽,同时,CLBO 晶体的抗光损伤阈值几乎等于 BBO 晶体的两倍,这意味着采用 CLBO 晶体做参量效应可以获得更大的功率。由于 CLBO 的匹配角更大,所以,它能达到比 BBO 晶体更远的远紫外波段,从而满足人们对大功率紫外光源的需求。Umemura 等人给出了 CLBO 做 OPO 参振晶体的实验结果^[7],他们得到的可调谐波长最短达到 185nm。

上述非线性光学材料主要应用于紫外至近红外光区的 OPO 中,可匹配的波长最长也只有 4.5 μm ,纳秒 OPO 的另一个发展趋势是将可调谐范围向远红外波段拓展,由于一些半导体材料的光学透明区在 10 μm ~20 μm ,所以近年来半导体材料做 OPO 参振晶体的研究很受关注,这类半导体材料主要有 Te, Ag_3AsS_3 , CdSe, AgGaSe_2 , AgGaS_2 , GaSe, HgS, TAS 等等,以 GaSe 为例,Vodopyanov^[8]报道了用 2.8 μm 的红外激光泵浦 GaSe 晶体的光参量现象,得到的可调谐范围为 8 μm ~13 μm 。

4 近期有关纳秒 OPO 的研究简介

迄今为止,纳秒 OPO 的理论与实验研究已经开展得比较充分,近来有关纳秒 OPO 的报道不是很多。但因为纳秒光参量振荡器自身结构的特点,其输出线宽、参量光模式等问题还有待进一步改进,故目前仍陆续有关于纳秒 OPO 方面的文章发表。

黄骢等对制约纳秒级 OPO 输出线宽的因素进行了理论分析及数值计算^[9],从泵浦光、非线性晶体的高增益系数、参量噪声自发辐射和温度变化等几个方面对输出参量光线宽的影响进行了讨论,结论是采用窄线宽和发散角小的泵浦源,并在腔内插

入压窄线宽的光学器件,减小温度起伏等可以大大压窄 OPO 的输出线宽。Mes 等人报道了行波腔纳秒 BBO-OPO 的实验结果^[10],他们采用单模 Nd:YAG 激光器的 3 次谐波泵浦 BBO 晶体,腔型采取环形腔结构,当用持续时间为 1.3ns 的单模激光脉冲对其进行泵浦时,所观察到的带宽为 0.5GHz。王丽等人将纳秒级窄线宽钛宝石激光作为种子注入 BBO-OPO 中^[11],获得的参量光线宽小于 0.1nm。

王月珠等人报道了利用 Nd:YAG 激光器基频波及 2 次谐波做抽运源^[12],采用临界及非临界相位匹配方式抽运 KTP 光参量振荡器的实验结果,实验中获得了具有实用价值的 1.53 μm ~1.84 μm 的人眼安全激光,其输出最大能量达 130mJ,最高能量转换效率为 64%。Bapna 将染料激光器输出的放大自发辐射激光作为种子注入到纳秒 BBO 光参量振荡器中^[13],实验测得参量振荡的阈值降低了 33%,他们采用的泵光是单模 Nd:YAG 激光的 3 次谐波 355nm,采用掠入射光栅的方法实现 BBO 的参量调谐,光栅入射角为 89°的时候得到的参量光线宽是 0.1nm。Anstett 等人报道了采用二类匹配方式 BBO 光参量振荡器的实验结果^[14],他们用调 Q Nd:YAG 激光器输出的 3 次谐波泵浦 BBO 晶体,获得的参量光调谐范围是 400nm~2500nm,信号光的转换效率为 33%,输出线宽小于 0.1nm,随后他们进行了参量光倍频实验,倍频晶体也采用 BBO 晶体,其最大能量转换效率超过 35%。

5 结 论

由于纳秒光参量振荡器在参量振荡中的独特地位,使得它成为当前应用最为广泛的一种激光调谐光源。纳秒 OPO 的转换效率很高,有些甚至可以超过 60%^[15]。现在可以利用的非线性晶体很多,使得光参量振荡器可以覆盖从可见到远红外的很宽的光谱范围,经倍频、混频等手段后可扩展至紫外乃至远紫外等区域。纳秒 OPO 的缺点是输出光束质量不高和信号光的输出线宽较大,所以,尽可能地改善输出光质量是当前 OPO 的发展方向之一。

OPO 的发展历程与新型非线性光学晶体的开发密切相关,本文中对 OPO 中经常用到的晶体做了介绍,并着重介绍了 BBO, LBO, CLBO 等新型非线性晶体的物化性质及光学参数,分别讨论了它们做 OPO 参量晶体的优缺点。

在过去 10 年间,由于泵浦光源、镜面镀膜、非线性

(下转第 121 页)

3 分析与讨论

3.1 SiC 对熔覆层组织和相结构的影响

Co 基合金熔覆层的相结构为 γ -Co 和 Cr₂₃C₆^[8]。 γ -Co 仅在 421 °C 以上稳定存在, 低于此温度即转变为向稳定的 hcp 点阵。室温条件下, 平衡凝固的 Co 基固溶体是 hcp 点阵。由于钴基合金粉末中含有一定量的 Ni, 且 Ni 有稳定 fcc 点阵的作用; 另外, 激光熔覆为快速凝固过程, 高温状态 γ -Co 相在快速凝固、冷却过程中来不及发生相的转变, 故在熔覆层中, Co 以面心立方相的 γ -Co 固溶体组织存在, 可以推断其中还固溶有 Cr, Ni 和 W 等元素。

本次试验中加入 20% SiC, 而衍射图中没有找到 SiC 的衍射峰, 其原因可能是由于高能密度激光的作用, 使 SiC 颗粒发生分解, SiC 分解的 C, Si 与高温熔池中的合金元素反应生成 Si₂W, CoWSi, Cr₃Si, CoSi₂ 等相。

激光作用的熔池其凝固属于快速动态凝固过程, 熔池底部通过基体散热, 相当于快速定向凝固结晶, 晶粒的结晶方向垂直于界面向熔池中生长。随凝固结晶的不断进行, 因多渠道的散热, 导致多方向的结晶。熔池中剩余液体过冷度增大, 高温熔池中形成的上述新相可作为异质形核的核心, 形核率增大, 晶粒细化, 在最后凝固区域出现等轴、准等轴晶。

3.2 SiC 对熔覆层性能的影响

加入 SiC 的熔覆层的耐磨性比 Co 基合金好, 其原因除了熔覆过程中由于高能密度的激光作用, SiC 高温分解后的 Si 和 C 固溶于初生相 γ -Co 枝晶中, 增强了对 γ -Co 枝晶的固溶强化作用^[9]; 另外, SiC

的分解也促进了 Si 与 Co, Cr, W 等形成上述细小的化合物。这些化合物弥散分布或者与 γ -Co 形成共晶, 使得熔覆层得到强化, 提高了熔覆层的耐磨性。Co 基合金磨损后期失重较大, 是由于熔覆层中强化较弱且熔覆层自表面向下晶粒逐渐增大所致。

4 结论

(1) 激光熔覆过程中 SiC 完全熔化解, 与 Co-Cr-W-Ni-Si 合金形成 Si₂W, CoWSi, CoWSi, Cr₃Si 金属间化合物及 γ -Co 合金固溶体; (2) 熔覆层由结合区、基体及热影响区组成, 由靠近白亮区的平面结晶逐步过渡为胞状晶、树枝晶及等轴枝晶, 且晶粒变细; 结晶方向由界面处垂直于界面逐步过渡为表面的多方向结晶; (3) SiC 的加入提高了熔覆层的耐磨性。

参考文献

- [1] Yue T M, Hu Q W, Mei Z *et al.* Materials Letters, 2001, 47: 165 ~ 170.
- [2] Shepelova L, Medres B, Kaplan W D *et al.* Surface and Coatings Technology, 2000, 125: 45~ 48.
- [3] Wang H M, Chen Y L, Yu L G. Materials Science and Engineering, 2000, A293: 1~ 6.
- [4] Li T J, Lou Q H, Dong J X *et al.* Applied Surface Science, 2001, 172: 331~ 344.
- [5] 杨永强, 田乃良. 中国激光, 1995, A22 (8): 632~ 636.
- [6] Cappelli E, Orlando S, Pinzari F *et al.* Applied Surface Science, 1999, 138~ 139: 376~ 382.
- [7] Kurz W. Fundamentals of solidification. 3rd revised edition. Switzerland: Trans Tech Publication Ltd, 1989.
- [8] Oliveira A S, Silva P S, Vikar R. Surface and Coatings Technology, 2002, 153: 203~ 209.
- [9] 杨永强, 文效忠. 中国激光, 2000, A27(10): 941~ 946.

(上接第 118 页)

性晶体质量的改进以及新型非线性晶体的研制等方面的迅猛发展, 使得纳秒 OPO 作为一种实用化的宽带可调谐光源成为可能, 纳秒 OPO 的研究重新得到人们的极大关注。国际上各大激光公司已陆续推出了许多成型的 OPO 商用产品, 其波长范围从可见到近、中红外连续可调。应该说, 当前纳秒 OPO 的研究工作远没有停止, 相信随着研究的不断深入, 纳秒 OPO 的更多特点与用途也将逐渐被发掘出来, 其输出光束质量也必将会有更大幅度的提高。

参 考 文 献

- [1] Giordmaine J A, Miller R C. Phys Rev Lett, 1965, 14: 973.
- [2] 秦莉娟, 周志尧, 包学诚. 现代科学仪器, 2000(1): 31.

- [3] Lowenthal D D, Bothell A C. SPIE Proc, 2000, 3613: 155.
- [4] 王月珠, 姚宝权, 王 琪. 光学学报, 2000, 20(10): 1368.
- [5] Bapna R C, Dasgupta K, Nair L G. Opt & Laser Technol, 1997, 29(6): 349.
- [6] Tang Y, Cui Y, Dunn M H. Opt Lett, 1992, 17(3): 192.
- [7] Umemura N, Kato K. Appl Opt, 1997, 36(27): 6794.
- [8] Vodopyanov K L. Opt Commun, 1998, 150: 210.
- [9] 黄 骧, 张少军, 王 丽. 激光技术, 2000, 24(4): 252.
- [10] Mes J, Hogervorst W, Tugbaev V. Opt Commun, 2001, 196: 229.
- [11] 王 丽, 杨 建, 黄 骧. 中国激光, 2002, 29(2): 104.
- [12] 王月珠, 姚宝权, 王 琪. 光学学报, 2000, 20(10): 1368.
- [13] Bapna R C, Dasgupta K. Opt & Laser Technol, 2001, 33: 125.
- [14] Anstett G, Goritz G, Kabs D *et al.* Appl Phys, 2001, B72: 583.
- [15] Fix A, Schroder T, Wallenstein R *et al.* J O S A, 1993, B10: 1744.