

文章编号: 1000-2618(2001)03-0013-06

# 可调谐紫外激光器研究进展

巨养锋<sup>2</sup>, 罗 烽<sup>1</sup>, 姜连勃<sup>1</sup>, 阮双琛<sup>1</sup>, 龙井华<sup>2</sup>

(1. 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060; 2. 中国科学院西安光机所, 西安 710068)

**摘 要:** 介绍了调谐紫外激光器的应用及各种产生调谐紫外激光输出的原理和方法, 并对其进行对比, 指出紫外调谐激光器向全固体化、小型化发展的趋势。

**关键词:** 调谐激光器; 紫外激光器; 固体激光器

中图分类号: TN 248.4 文献标识码: A

可调谐紫外激光器在物理学、化学、生物学、医学、环境遥测及军事领域, 如分子光谱测量、微电子学、光化学、光生物学、DNA 序列测量、角膜成形术、血管成形术、大气臭氧层探测及紫外差动吸收光雷达系统、生化武器监测和战地保密无线通信等领域有着重要的应用。其发展需求, 促进了人们对结构简单可靠、大调谐范围的可调谐紫外激光器的研究。

## 1 染料激光器

染料激光器是以某种有机染料溶解于一定溶剂(甲醇、乙醇或水等)中作为激活介质的激光器。自1966年问世以来, 染料激光器获得了迅速的发展。在紫外区的染料主要是闪烁体染料, 覆盖了320~400nm波长范围。由于紫外光会使有机染料分子化学键断裂, 所以不易获得。为了克服常规染料激光器使用液体染料易退化, 装置复杂等缺陷, 1997年, 中科院上海光机所报道了首台固体染料激光器<sup>[1]</sup>, 其调谐范围为590~650nm, 证明了固体染料激光器的可实现性, 缺点是染料退化较快。固体染料激光器的出现, 取代了操作麻烦和不安全的染料池, 使染料激光器结构更紧凑, 趋于小型化。文献[2]报道的固体染料散射反馈激光器, 采用Exalite公司生产的掺杂紫外染料377E的sol-gel硅条, 利用了Nd:YAG的二次谐波泵浦, 波长为308nm, 激光器输出调谐范围为367~383nm, 斜效率达4.4%, 其缺点是: 因硅条表面积累效应, 工作一定时间后, 激光器的输出会明显降低。

## 2 准分子激光器

准分子激光器与其他分子激光器不同, 后者的激光跃迁发生在束缚态之间, 而准分子激光器的激光跃迁则发生在束缚的激发态与排斥的基态(或弱束缚)之间, 属于束缚-自由跃迁。其特点之一为: 准分子荧光谱为一连续带, 可实现波长可调谐运转。准分子激光器的输

收稿日期: 2001-06-10

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(00JS08.3.1.QT5101)

作者简介: 巨养锋(1968-), 男(汉族), 陕西省乾县人, 中国科学院西安光机所博士研究生。E-mail: juyf163@163.net

出波长位于紫外区到可见区。紫外区的准分子激光器为稀有气体类和稀有气体卤化物类。文献[3]通过利用改进的 ArF 准分子激光器的受激拉曼散射(SRS)的斯托克斯(Stocks)跃迁,产生了 190240nm 的深紫外输出,初级振动斯托克斯能量转换效率接近 70%,拉曼量子阱内斯托克斯脉冲能量从 0.2 $\mu$ J 到 58mJ。

### 3 调谐紫翠宝石激光器

紫翠宝石( $\text{Cr}^{3+}$  BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)是第一个实用的可调谐固体激光介质<sup>[4]</sup>。尽管人们一开始并未发现其潜在的调谐性能,而研究用其替代红宝石,作为固定波长激光介质。直到 1977 年,John C. Walling 发现其电子振动特性产生的调谐性能。紫翠宝石具有良好的热传导性,较强的各向异性使得偏振发射增强,不产生热感应双折射,抗热冲击性能良好,更重要的是,Cr 离子与受主晶格近乎理想的耦合使荧光寿命延长,能量存储性能突出,并实现较宽的增益带宽。紫翠宝石的吸收带为 380630nm,吸收峰值为 590nm,因此适合用通常的闪光灯泵浦;它的另一个吸收峰值在 680nm 附近,可以用激光二极管作泵浦源。现在,经过 20 年的发展,紫翠宝石激光器的应用已从其基波 720800nm 转移到二次谐波 360400nm、三次谐波 240270nm 和四次谐波 180200nm,覆盖了大部分紫外区域。

紫翠宝石激光器具有两个突出优点:①从实用角度说,它是可直接用闪光灯(或二极管激光器)泵浦的波长最短的固体激光器;②其谐波覆盖了大部分紫外区域。例如,Light Age 公司的 101PAL 激光器可以从 360400nm 输出数百毫焦的紫外脉冲激光,满足光纤耦合时需要高能量并对人眼安全(380nm)的要求。文献[5]将紫翠宝石激光器的基波和二次谐波在 BBO 晶体中混频,I 型相位匹配,得到了 244259nm 的紫外输出,最大混频效率为 24%。

### 4 染料激光器经非线性光学频率变换

染料激光器的出现,极大地推动了科学技术的发展,在 3001~100nm 范围的可调谐激光器中,染料激光器一度占据统治地位。染料激光器突出的优点是其输出波长可调谐,它不仅可直接获得从 3001300nm 光谱范围内连续可调谐的窄带高功率激光,且可通过非线性光学频率变换等技术得到从真空紫外到中红外的可调谐相干光。因此,染料激光器是目前光谱学研究中应用最多的一种激光器。此外,它还具有光谱分辨率高、结构简单、价格便宜等优点。缺点是稳定性比较差,染料处置,如染料退化、染料更换等比较复杂。在可见光谱内的高能相干调谐辐射源中,脉冲染料激光器居于举足轻重的位置。文献[6]用 KDP 晶体对环形染料激光器输出(560nm)进行倍频,得到 280nm 的紫外输出,其调谐范围为 277283nm。文献[7]采用 Nd:YAG 激光器的二次谐波同步泵浦两个脉冲染料激光器,第一个染料激光器的输出首先在 KDP 晶体中倍频,然后在 BBO 晶体中与第二个染料激光器的输出进行和频混合,产生低于 205nm 的高功率、频率稳定性好的调谐激光输出。文献[8]采用两个脉冲染料激光器(其中一个经过倍频)在 BBO 晶体中进行 I 型和和频,产生从 188.9nm 到 197nm 的输出;同时,用准分子激光器(KrF)代替倍频染料激光器,实现了准分子波长从 248.5nm 到 193nm 的转移。

## 5 半导体激光器经非线性光学频率变换

半导体激光器以其结构紧凑、工作可靠、效率高、操作简单、维护方便而倍受人们青睐。但由于其发光位于红光和红外区域, 限制了它的使用范围。为了将其波段扩展到短波区域, 人们开始利用非线性晶体的频率上转换技术、二次谐波产生技术 (SHG) 和和频产生 (SFG) 技术将其波段延伸到蓝光和紫外区域。文献 [9] 为了用固体激光器实现对  $\text{Cd}^+$  的激光冷却 (因  $\text{Cd}^+$  可作为未来的微波区域的频率标准), 采用外腔单模调谐半导体激光器和两个谐振增强腔谐振结构。在一级谐振增强腔中, 采用  $\text{KNbO}_3$  非线性晶体进行倍频 (非临界相位匹配) 得到 429nm 谐波; 在二级谐振增强腔中, 采用 BBO 非线性晶体进行倍频 (频率上转换), 得到 214.5nm 谐波。在保证两个谐振增强腔谐振的前提下, 通过改变半导体激光器的注入电流可实现调谐; 其调谐范围为 210238nm。文献 [10] 采用高功率锁模半导体激光器 (858nm) 在  $\text{KNbO}_3$  晶体中的二次谐波 (THG, 429nm) 与基波 (858nm) 在  $\text{Li}_3\text{BO}_5$  晶体中和频混合, 得到 286nm 的紫外输出, 其调谐范围为 285290nm。用半导体激光器经非线性光学频率变换得到调谐紫外激光输出的装置很复杂。

## 6 掺钛蓝宝石激光器经非线性光学频率变换

掺钛蓝宝石激光器目前是固体可调谐激光器中发展最迅速、最成熟、最实用、应用最广泛的一种, 其荧光峰值为 780nm, 而在 700900nm 范围内可调谐功率最高, 很适合作为非线性晶体进行频率变换的基波。它产生的二次谐波范围为 350470nm, 三次谐波范围为 235-300nm, 四次谐波范围为 210nm 左右。因此, 人们用它经过非线性光学频率变换得到紫外激光输出, 产生低于 400nm 的二次谐波, 适合的非线性晶体有 LBO、BBO 和  $\text{LiIO}_3$ , 其中, LBO 具有更小的走离角和更好的温度调谐性能。在文献 [11] 中采用脉冲掺钛蓝宝石激光器, 利用调谐范围 700900nm 的三次谐波 198300nm 与另外的 Nd:YAG (1064nm) 激光和频, 可产生 198300nm 的紫外输出, 功率大于 8mW。文献 [12] 采用 LBO 晶体对钛宝石激光输出进行腔内倍频, 产生紫外输出, 在 398nm 处得到 460mW 的输出, 对应的红外-紫外转换效率高于 70%。

## 7 光学参量振荡器和和频方案

光学参量振荡器 (OPO) 是利用非线性晶体的混频特性实现光学频率变换的器件, 它既是非线性光学频率变换的器件, 又是波长可调谐的光源, 具有调谐范围宽、结构简单及工作可靠等特点。随着新的、高效的非线性晶体的出现及发展, 光学参量振荡器以其宽调谐范围、高效率、高重复频率、高分辨率和固体小型化的特点日益引起人们的重视。其发展与光学谐波产生及非线性晶体密不可分。在紫外波段一般采用 BBO 晶体。在文献 [13] 中, 采用新设计的高重复率的再生放大系统泵浦全调谐光学参量放大器 (OPA), 得到 510610nm 脉冲输出, 再经 BBO 倍频, 产生接近转换极限的紫外 255305nm 脉冲输出, 转换效率较高。在文献 [14] 中, 采用 Nd:YAG 激光的谐波用 KTP 晶体进行腔内和频混合构成纳秒光学参量

振荡器,其紫外输出为230330nm.当Nd YAG激光的基波能量为410mJ时,对应的紫外输出能量最高为20 mJ,相应的总转换效率约为5%(基波).

## 8 掺Ce<sup>3+</sup>的激光晶体

理论研究和实验证明:泵浦掺有稀土元素离子的晶体是产生可调谐紫外、甚至真空紫外激光输出的最简捷方法<sup>[15]</sup>,其中最合适的为Ce<sup>3+</sup>.由于激活介质的光化学性质不稳定及激发态吸收的影响,早期仅找到Ce<sup>3+</sup> LiYF<sub>4</sub>、Ce<sup>3+</sup> LaF<sub>3</sub>、Ce<sup>3+</sup> LiLuF<sub>4</sub>和Ce<sup>3+</sup> Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>,并实现了固态紫外激光器在窄范围内的调谐运转.当时,采用的泵浦源是准分子(KrF或ArF)激光器.近年来,人们又研制出了一批新的固体可调谐紫外激光晶体,这些晶体都是掺有Ce<sup>3+</sup>离子的氟化物晶体,包括:Ce LiCAF(Ce<sup>3+</sup> LiCaAlF<sub>6</sub>)、Ce LiSAF(Ce<sup>3+</sup> LiSrAlF<sub>6</sub>)、Ce LLF(Ce<sup>3+</sup> LuLiF<sub>4</sub>)和Ce SAF(Ce<sup>3+</sup> SrAlF<sub>5</sub>)等.最早利用Ce LiCAF晶体作为固体可调谐紫外激光材料的是俄罗斯的M. A. DUBINSKII及其同事,在1992年他们报道了首台采用Ce LiCAF的全固态可调谐紫外激光器<sup>[16]</sup>,泵浦源为倍频的Nd YAG激光器,再经过附加的KD\*P倍频,得到波长266nm的四次谐波泵浦,其调谐范围为281-297nm.其后他又首次提出注入种子式调谐紫外激光器,解决了通常相互排斥的窄带宽和高转化效率间的矛盾,其带宽为0.0015nm,斜效率达到32%.J. F. Pinto等直接用Nd YAG激光器的266nm谐波对Ce LiSAF晶体进行纵向泵浦,在290nm处,其输出能量为5.4mJ,相应斜效率为16%,调谐范围283313nm.1997年,他们用Ce LiSAF晶体研制出散射反馈调谐紫外激光器,其调谐范围为289293nm,线宽小于1Å. Nobuhiko Sarukura等<sup>[17]</sup>分析了Ce LLF晶体的宽带增益特性及其在紫外短脉冲放大中的应用,首次实现了用固体材料对紫外脉冲进行直接放大.其后,他们又采用自注入式结构,用KrF准分子激光器(λ=248nm)泵浦,直接得到了亚纳秒脉冲序列.由于Ce LLF晶体可用来直接产生短脉冲,故在紫外短脉冲研究领域很有发展前途.

在上述产生紫外激光输出的方法中,采用非线性光学频率变换技术产生紫外输出结构复杂、效率较低;液体染料激光器的染料处置复杂;固体染料激光器和掺有稀土元素Ce<sup>3+</sup>的固体激光器满足紫外可调谐激光器固体化、小型化的发展趋势.

### 参考文献:

- [1] Hu Wentao, Ye Hui, Li Chuangdong, et al. Nd YAG激光泵浦的全固态调谐DCM染料激光器[J]. 应用光学, 1997, 3(3): 579-583. (英文版).
- [2] Zhu Xiao-lei, Dennis Lo. 在近紫外调谐的散射反馈sol-gel染料激光器[J]. 应用物理快报, 2000, 77(17): 2647-2649. (英文版).
- [3] R Jeffrey Balla, Herring. G C调谐ArF激光在波长190-240nm的拉曼频移[J]. 科学仪器评论, 2000, 71(5): 2246-2247. (英文版).
- [4] Brian Pryor. 调谐紫翠宝石激光器在紫外得到应用[J]. 激光集锦, 1999(10): 73-76. (英文版).
- [5] Shinchi Imai, Toshitaka Yamada, Yasutomo Fujimori, et al. 紫翠宝石激光在β-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>中的三次谐波[J]. 应

- 用物理快报, 1989, 54(13): 1206-1208. (英文版).
- [6] Nielsen J S. 用 KDP 晶体倍频产生 90mW、280nm 的调谐激光输出 [J]. 光学快报, 1995, 20(8): 840-842. (英文版).
- [7] Heitmann U, Kotteritzsch M, Heitz S, et al. 用 BBO 晶体混频产生低于 205nm 的真空紫外输出 [J]. 应用物理 B, 1992, 55: 419-423. (英文版).
- [8] Muckenheim W, Lokai P, Burghardt B, et al. 用 BBO 晶体混频产生 189197nm 紫外输出 [J]. 应用物理 B, 1988, 45: 259-261. (英文版).
- [9] Matsubara K, Tanaka U, Imajo H, et al. 全固态半导体激光器的二级倍频产生调谐 214.5nm 连续波输出 [J]. 应用物理 B, 1998, 67: 1-4. (英文版).
- [10] Lew Goldberg, Kliner D A V. 用高功率、锁模半导体激光器的倍频产生 286nm 的调谐紫外输出 [J]. 光学快报, 1995, 20(15): 840-842. (英文版).
- [11] Meguro T, Caughey T, Wolf L, et al. 固态可调谐深紫外 198300nm 激光器 [J]. 光学快报, 1994, 19(2): 102-104. (英文版).
- [12] Zhou W L, Mori Y, Sasaki T, et al. 腔内倍频效率高于 70% 的连续钛宝石激光器 [J]. 应用物理快报, 1995, 66(19): 2463-2465. (英文版).
- [13] Ziegler L D, Morais J, Zhou Y, et al. 在紫外 250310nm 区域产生 50fs 调谐脉冲 [J]. IEEE 量子电子学报, 1998, 34(9): 1758-1763. (英文版).
- [14] Fix A, Ehret G. 产生连续调谐紫外辐射的腔内混频的脉冲光参量振荡器 [J]. 应用物理 B, 1998, 67: 331-338. (英文版).
- [15] 巨养锋, 阮双琛.  $Ce^{3+}$  可调谐固体紫外激光器研究进展 [J]. 光子学报, 2000, 29(21): 161-165.
- [16] Dubinskii M A, Semashko V V. 一种新的全固态紫外激光器 [J]. 现代光学学报, 1993, 40(1): 1-5. (英文版).
- [17] Nobuhiko Sarukura, Zhenlin Liu. 自注入种籽固体紫外激光器直接被动产生亚纳秒脉冲链 [J]. 光学学报, 1995, 20(6): 599-601. (英文版).

## Advance in Tunable Ultraviolet Laser

JU Yang-feng<sup>2</sup>, LUO Feng<sup>1</sup>, JIANG Lian-bo<sup>1</sup>,  
RUAN Shuang-chen<sup>1</sup> and LONG Jing-hua<sup>2</sup>

1) School of Engineering and Technology  
Shenzhen University  
Shenzhen 518060  
P. R. China

2) Xi'an Institute of Optics and  
Precision Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences  
Xi'an 710068  
P. R. China

**Abstract:** The tunable ultraviolet laser applications and ways to produce tunable ultraviolet laser are introduced. Comparison between various kinds of ultraviolet lasers indicates the development trend of them is all-solid-state and miniaturization.

**Key words :** tunable laser ; ultraviolet laser ; all-solid-state laser

**References :**

- [ 1 ] Hu Wentao , Ye Hui , Li Chuangdong , et al. All-solid-state tunable DCM dye laser pumped by a diode-pumped Nd : YAG laser [ J ]. Appl Opt , 1997 , 36( 3 ) : 579-583 .
- [ 2 ] Zhu Xiao-lei , Dennis Lo. Distributed-feedback sol-gel dye laser tunable in the near ultraviolet [ J ]. Appl Phys Lett , 2000 , 77( 17 ) : 2647-2649 .
- [ 3 ] R Jeffrey Balla , Herring. G C Raman shifting a tunable ArF laser to wavelengths of 190-240nm [ J ]. Rev Sci Instrum , 2000 , 71( 5 ) : 2246-2247 .
- [ 4 ] Brian Pryor. Tunable alexandrite lasers find ultraviolet applications [ J ]. Laser Focus World , 1999 , ( 10 ) : 73-76 .
- [ 5 ] Shinichi Imai , Toshitaka Yamada , Yasutomo Fujimori , et al. Third-harmonic generation of an alexandrite laser in  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [ J ]. Appl Phys Lett , 1989 , 54( 13 ) : 1206-1208 .
- [ 6 ] Nielsen J S. Generation of 90mW continuous-wave tunable laser light at 280nm by frequency doubling in a KDP crystal [ J ]. Opt Lett , 1995 , 20( 8 ) : 840-842 .
- [ 7 ] Heitmann U , Kottwitzsch M , Heitz S , et al. Efficient generation of tunable VUV laser radiation below 205nm by SFM in BBO [ J ]. Appl Phys B , 1992 , 55 : 419-423 .
- [ 8 ] Muckenheim W , Lokai P , Burghardt B , et al. Attaining the wavelength range 189197nm by frequency mixing in  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [ J ]. Appl Phys B , 1988 , 45 : 259-261 .
- [ 9 ] Matsubara K , Tanaka U , Imajo H , et al. An all-solid-state tunable 214.5nm continuous-wave light source by using two-stage frequency doubling of a diode laser [ J ]. Appl Phys B , 1998 , 67 : 1-4 .
- [ 10 ] Lew Goldberg , Kliner D A V. Tunable UV generation at 286nm by frequency tripling of a high-power mode-locked semiconductor laser [ J ]. Opt Lett , 1995 , 20( 15 ) : 840-842 .
- [ 11 ] Meguro T , Caughey T , Wolf L , et al. Solid-state tunable deep-ultraviolet laser system from 198 to 300nm [ J ]. Opt Lett , 1994 , 19( 2 ) : 102-104 .
- [ 12 ] Zhou W L , Mori Y , Sasaki T , et al. Intracavity frequency doubling of a continuous wave Ti : sapphire laser with over 70% conversion efficiency [ J ]. Appl Phys Lett , 1995 , 66( 19 ) : 2463-2465 .
- [ 13 ] Ziegler L D , Morais J , Zhou Y , et al. Tunable 50fs pulse generation in the 250310nm ultraviolet range [ J ]. IEEE J Quantum Electron , 1998 , 34( 9 ) : 1758-1763 .
- [ 14 ] Fix A , Ehret G. Intracavity frequency mixing in pulsed optical parametric oscillators for the efficient generation of continuously tunable ultraviolet radiation [ J ]. Appl Phys B , 1998 , 67 : 331-338 .
- [ 15 ] JU Yang-feng , RUAN Shuang-chen. Advance in Ce<sup>3+</sup>-doped tunable solid-state ultraviolet laser [ J ]. Acta Photonica Sinica , 2000 , 29( Z1 ) : 161-165 . ( in Chinese ) .
- [ 16 ] Dubinskii M A , Semashko V V. A new concept of all-solid-state tunable ultraviolet laser [ J ]. J Mod Opt , 1993 , 40( 1 ) : 1-5 .
- [ 17 ] Nobuhiko Sarukura , Zhenlin Liu. Direct and passive subnanosecond pulse-train generation from a self-injection-seeded ultraviolet solid-state laser [ J ]. Opt Lett , 1995 , 20( 6 ) : 599-601 .