

文章编号: 0253-2239(2003)03-0330-05

高效全固化紫外四倍频激光器的研究*

程光华 于连君 王屹山 刘青 赵卫 陈国夫

(中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要: 用半导体激光器抽运的调 Q YLF 倍频激光器抽运掺钛蓝宝石激光器, 用 LBO 晶体在腔内产生二次谐波, 再聚焦到 BBO 晶体上产生四次谐波深紫外激光。为了提高谐波转换效率, 在腔内分别插入了单片、组合双折射滤光片和聚焦透镜, 在平均功率为 3.6 W, 波长为 527 nm 的抽运光下得到 410 mW, 417 nm 的蓝光。用长焦距的透镜聚焦二次谐波, 得到 34 mW, 208 nm 的紫外脉冲激光。从实验上详细研究了基频光的线宽对二次谐波效率的影响、二次谐波的线宽对四次谐波效率的影响、基频光的波长对四次谐波产生效率的影响。全面地分析了单片和组合双折射滤光片及抽运功率对钛宝石激光器基频光的脉宽、线宽等参量的影响。

关键词: 钛宝石激光器; 二次谐波产生; 四次谐波产生; 线宽; 紫外激光

中图分类号: TN248 文献标识码: A

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器具有调谐范围宽(670~1200 nm)、输出功率大(几十瓦)、转换效率高、运转方式多等优点, 是发展最迅速、技术最成熟、使用最广泛的一种固体可调谐激光器^[1]。钛宝石激光的二次谐波蓝光是水下通信和探测的最佳海水“窗口”, 四次谐波紫外光在诸如生物学、医学诊治等领域有很广泛的应用。而利用光学性质和物理性能优异的钛宝石和各种倍频晶体组成的波长各异的全固体脉冲激光系统, 以其波长可变、结构紧凑、性能稳定等优点将会得到越来越多的应用。钛宝石激光脉冲的二次谐波产生和四次谐波的产生已有大量报道^[2,3]。但通过和频的方法得到 200 nm 左右的紫外光的效率很低, 从钛宝石基频光到四倍频的效率不到 1%^[4,5]。

在本文中, 报道了用半导体激光器抽运的 Q-YLF 倍频激光器抽运钛宝石产生 834 nm 的纳秒红外光, 在其腔内插入 LBO 晶体得到重复率 1 kHz 的 410 mW 的 417 nm 脉冲蓝光, 再将蓝光聚焦到 BBO 上, 可得到 34 mW 的 208.5 nm 的紫外光。这是一套全固体脉冲激光系统, 该系统结构紧凑, 性能稳定, 使用寿命长, 已达到实用化要求。

2 几个影响倍频效率的重要因素

下面主要分析一下在该系统中影响倍频效率的几个主要因素。

2.1 腔外倍频理论

二次谐波转换效率可写为^[6]。

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[l_c K^{0.5} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{0.5} \frac{\sin(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2} \right], \quad (1)$$

其中 $K = 2 \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1.5} \omega^2 d_{\text{eff}}^2$, Δk 为相位失配, l_c 为非线性晶体长度, A 为基波光束截面积, ω 为基波光束频率, d_{eff} (单位是 As/V^2) 为晶体的有效非线性系数, μ_0 和 ϵ_0 分别为真空中的磁导率和真空中的介电常量, ϵ_r 为非线性晶体的相对介电常量, P_{ω} 为基波功率。(1) 式可近似写为

$$P_{2\omega} = \eta \frac{P_{\omega}^2}{A}, \quad (2)$$

其中

$$\eta = l_c^2 K \frac{\sin^2(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2}.$$

(1) 式、(2) 式表明, 要提高倍频效率, 就要设法增大 μ , 提高基频光功率 P_{ω} 和减小基波面积 A 。实验中要尽量减小相位失配, 因此, 为了提高倍频效率, 就要使基频光的振荡线宽尽可能的窄或采用非临界相位匹配。在严格满足相位匹配条件下, 基波光的聚焦提高了峰值功率密度, 因此明显提高了倍频效率。但在紧聚焦条件下, 激光束腰 ω_0 很小, 相当比例的基波光在倍频晶体上的入射角偏离相位匹配角, 造成严重的相位失配。因此, 如果过分强焦距, 反而会

* 国家自然科学基金(60078004)资助课题。

E-mail: guanghuacheng@163.com

收稿日期: 2002-04-10; 收到修改稿日期: 2002-05-27

造成倍频效率下降。另外,基波光脉冲尽可能短也会有助于提高倍频效率,由于短的脉冲会导致高的峰值功率密度。因此,优化设计基波光源的腔型以产生短脉冲、小的发散角、窄的线宽、完全的相位匹配是提高倍频效率的四个关键因素,这也正是本文中重点解决的问题。

2.2 腔内倍频理论

为了提高二次谐波转换效率,通常把倍频晶体放在激光腔内,因为腔内的功率密度远大于腔外的功率密度,尤其是连续输出激光器;但同时也要要求倍频晶体有高的损伤阈值。显然,内腔倍频除了要满足腔外倍频的要求外,还要对激光腔提出特殊的要求。我们知道激光稳定输出时有一个最佳透过率,在内腔倍频激光器中,把二次谐波看作基波的非线性损耗,最佳透过率相对于二次谐波的转换率。在小信号近似下的最佳耦合系数和最佳透过率与增益无关,一旦耦合系数调到最佳值,在任何抽运水平下,都会保持最佳耦合,这与一般激光器的最佳耦合完全不同。为了有效地提高二次谐波的功率,就应在损伤阈值允许的条件下,尽可能大地增大激光棒中的模体积,同时减小倍频晶体中的光斑半径,即将倍频晶体放在基波束腰处。而且,二次谐波的功率密度随腔内线性损耗的增大而迅速下降,为此必须尽量减小腔内所有元件的线性损耗,工作物质和倍频晶体的端面也要镀增透膜。

2.3 LBO 的允许参量

LBO是双轴晶体,对于波长 830 nm,只有 XOY 平面可以实现相位匹配,I类匹配角为 28.8293° ,走离角为 0.8764° ;对波长 834 nm,匹配角为 28.4659° 。允许线宽可近似为 $\Delta\nu \approx 1/\Delta nl$, l 为晶体长度^[8],对波长 800 nm、8 mm 长的 LBO 允许线宽为: $\Delta\nu = 4.8$ nm。对 860 nm 波长、10 mm 长的 LBO 的允许角为 $\Delta\theta = 1.793^\circ$; $\Delta\varphi = 2.33^\circ$;允许温度变化 $\Delta T = 0.33$ °C。

2.4 BBO 的允许参量

1) BBO 是负单轴晶体,波长在 415 nm 时,I类($o+o=e$)相位匹配角是 79.72° 。

此相位匹配下,二次谐波的走离角为 -3.048° ,BBO 长度为 10 cm 时,晶体端面的走离达到 538 μm 。

2) 有效非线性系数^[5]为

$$d_{\text{eff}}(o+o=e) = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi,$$

$$d_{22} = 2.2 \text{ pm/V}, \quad d_{31} = 0.15 \text{ pm/V}.$$

图 1 中纵坐标为用 KDP 的 d_{36} 归一化后的值。从图 1 可以看出,随着基频光波长的减小,有效非线性系数迅速下降,因此在 208 nm 附近的倍频效率

不会高。

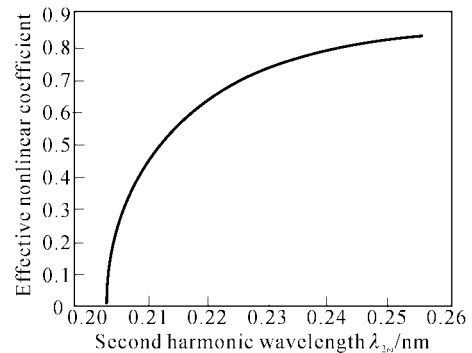


Fig.1 The effective nonlinear coefficient of BBO at ultraviolet region in type I phase match

3) 允许带宽可近似表达为: $\Delta\nu = 1/\Delta nl$,对 10 mm 长的 BBO 来说,允许线宽为 0.248 nm。

$$\Delta\lambda = \frac{2.7832\lambda_1}{\pi l(2dn_{o1}/d\lambda_1 - dn_{e2}/d\lambda_2)},$$

$\Delta\lambda$ 为 BBO 的允许线宽, l 为晶体长度^[9]。

4) 波长在 756 nm 的允许角^[10]为 0.28 mrad/cm。因此,要得到较高的四次谐波效率就需要高的二次谐波质量:小的发散角,窄的线宽,短的脉冲宽度。

3 实验结果及分析

实验中用半导体激光器抽运的 Q-YLF 倍频激光(美国 Photonics Industries DS-20)经聚焦后抽运钛宝石激光器,钛宝石激光器腔采用凹-平镜组成的稳定腔。其中 Q-YLF 可输出重复频率为 1 kHz、波长为 527 nm 的激光脉冲,平均功率最大为 4 W。 M_1 是凹面镜,对绿光镀增透膜。钛宝石长度为 20 mm,两端均为布儒斯特角切割。双折射滤光片由两片石英片组成,厚度分别为 5 mm 和 10 mm。 M_2 是楔型镜,其目的是避免腔镜的外表面反射形成子腔,即所谓的标准具效应,对 830 nm 光的反射率为

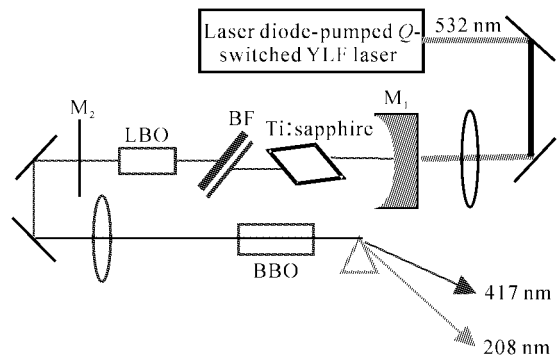


Fig.2 Experimental set-up of all-solid-state fourth frequency doubling ultraviolet laser

99.16%，对415 nm蓝光的透射率为95%。实验装置如图2所示。钛宝石激光器输出波长为832 nm的红外光，线宽约为0.8 nm，脉宽约为30 ns。在腔内插入非线性晶体LBO产生波长为416 nm的蓝光。倍频晶体LBO长度为8 mm，整体固定在水平旋转台上。用非线性晶体BBO进一步作四倍频，可产生波长为208 nm的紫外光。BBO晶体的长度为10 mm，为防止BBO晶体潮解，晶体的安装作了密封防潮保护。用棱镜将蓝光与紫外光分开。

由于钛宝石激光器的增益很宽，自由振荡的钛宝石激光器的线宽可达到100 nm，由上面的分析可知：LBO的允许线宽只有4 nm左右，因此，为了提高倍频效率必须对线宽进行压缩即模式选择。首先我们在腔内插入1 mm的双折射滤光片(birefringent filter)，实验结果如下。

3.1 加入单片双折射滤光片的基频光线宽特性

采用厚度为1 mm的双折射石英晶体作为波长

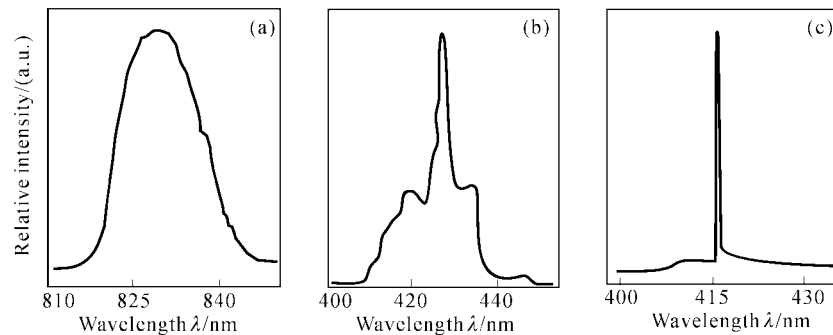


Fig. 3 Spectrum curve of Ti:sapphire laser (a) without birefringent filter; (b) with birefringent filter of $d=1$ mm quartz; (c) spectrum of the SHG. The FWHM of (a), (b) and (c) are 25.9 nm, 6.2 nm, 0.6 nm, respectively

插入一块厚度为4.767 mm的双折射滤光片后，倍频效率得到较大的改善。830 nm基频光线宽由6.2 nm降到1.72 nm，蓝光线宽从1.1 nm降到0.8 nm。此时，得到了410 mW的倍频蓝光，相应地得到了18 mW的紫外激光，效率较插入1 mm厚双折射滤光片提高了一倍。

3.2 腔内加组合双折射滤光片

为了进一步压缩基频光线宽，避免和频、光参量过程产生导致差的蓝光频谱，我们在腔内插入了两片双折射滤光片，厚度分别为5 mm和10 mm。基频光线宽为0.84 nm；实际线宽比允许线宽小得多，可以预期有较好的二次倍频效率和较窄的谐波线宽，这非常有利于提高四倍频的效率。蓝光的频谱图如图4所示，线宽为0.7 nm。光斑直径($1/e^2$)为0.5 mm，在同一透镜聚焦下，四倍频效率为8.9% (凸透镜引入8%的损耗)。加入两片双折射滤光片

选择元件，由于基频光线宽比较宽，腔内倍频效率只有9%，在3.6 W的抽运光抽运时，只得到330 mW的蓝光，四倍频的效率更低，只得到8 mW的紫外光。

实验中，插入一块厚度为5 mm的单晶石英双折射滤光片，其理论光谱半峰全宽是8.1 nm，自由光谱范围是16.2 nm。但没有加入任何线宽压缩元件时基频光的半峰全宽为24 nm，因此，插入单片双折射滤光片会出现两个峰(830 nm和845 nm)。为了充分利用基频光来提高倍频效率，需要采用组合式双折射滤光片或通过腔镜镀膜的办法将845 nm峰除去。实验中我们用镀膜的方法使845 nm透过率大于10%，使此峰不能起振，结果如图3所示。改进后的二次倍频效率和改进前变化不大，这是由于虽然改进前有一较高的次峰，但倍频效率与基频光功率密度的平方成正比，主、次两峰之间的间隔是15 nm，相位匹配角有一定的差距，仔细调节腔镜，得到二次谐波的频谱只有一个峰。

后，四倍频的效率明显提高，测量的线宽没有变窄的原因可能是由于测量的误差所致。在抽运功率为3 W时测得蓝光的脉宽为14 ns，四次谐波脉宽为10 ns。二次和四次谐波转换效率如图5所示。

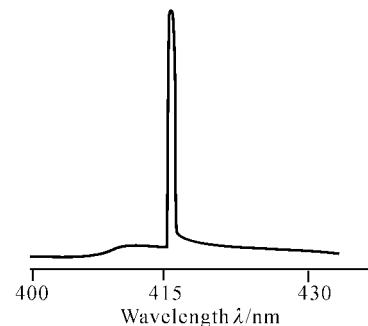


Fig. 4 The spectrum of second harmonic of Ti:sapphire laser

加入两片双折射滤光片后，二次倍频的效率并

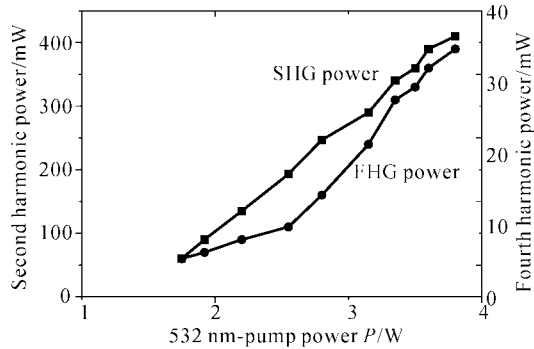


Fig. 5 The power of SHG and FHG of Ti:sapphire laser with two birefringent filters

没有增加,但二次谐波的线宽进一步减小,四次谐波产生的效率大大提高。在相同的蓝光功率下,四次谐波的效率提高了近一倍,最终我们得到了 34 mW 的 208 nm 紫外激光输出。由于钛宝石是双端布儒斯特角切割,双折射滤光片也以布儒斯特角插入,基频光是完全偏振的,二次谐波有很好的稳定性。

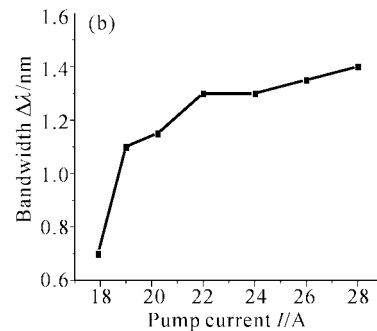
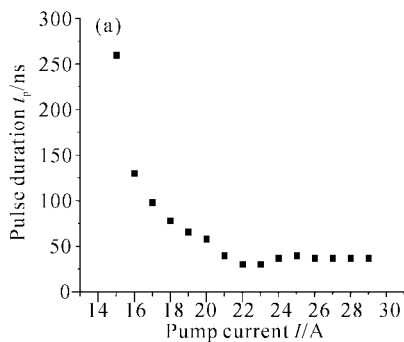


Fig. 6 The spectral linewidths vs pumping current. (a) is the pumping laser; (b) is Ti:sapphire laser at 830 nm

4.2 加入双折射滤光片或组合双折射滤光片后的基频光输出功率的变化

单片双折射滤光片和组合双折射滤光片在谐振腔中的作用有所不同,薄的单片双折射滤光片由于透过率的半峰全宽很宽,对波长的选择性较弱,小范围的旋转双折射滤光片对激光器的输出功率影响较小。而双折射滤光片的旋转能改变入射光束的相位,因此,可以有效地补偿由于热效应导致的基频光的失偏。组合双折射滤光片对激光波长的选择性很强,对特定的波长无法起到补偿失偏的作用。从图 7 可以看出插入组合双折射滤光片后的功率基本没有改变,说明双折射滤光片的插入损耗几乎为零,它只能压缩线宽,没有薄的双折射滤光片对热效应引起的相位差起补偿作用。因此有必要在腔内同时加入组合双折射滤光片和薄双折射滤光片或者是 1/2 波片。

4 腔内元件对钛宝石基频光特性的影响

4.1 加入双折射滤光片的激光振荡线宽与抽运功率的关系

由于线形增宽和模式竞争的影响,加入双折射滤光片的激光振荡线宽与双折射滤光片的透过率半峰全宽几乎相差一个数量级,而且随着抽运功率的增加,损耗较大的模式也有较大的增益,也能形成振荡,导致线宽的增加。由于抽运源输出脉冲宽度随着输出功率的增加而减小,钛宝石激光器也出现了相似的特性。从上面的分析可知,脉宽特性将直接影响输出脉冲的线宽特性。钛宝石激光器输出脉宽随抽运功率的增大而减小,单个脉冲在腔内振荡的次数减少,通过双折射滤光片的次数也相应地减少,线宽将会变宽。抽运源输出脉宽在电流 22 A 以上基本趋向稳定,钛宝石激光器输出线宽变化也开始缓慢。此外,随着抽运功率的增加,损耗较大的模式增益也较大,当增益超过损耗时,这些模式也开始振荡,导致激光线宽的增加。图 6 反映了这种变化。

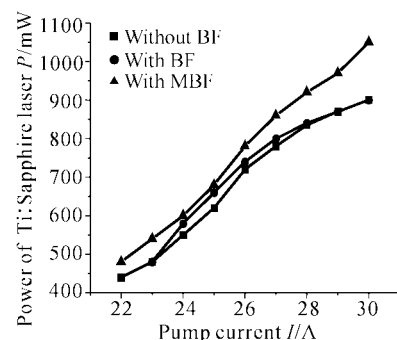


Fig. 7 The power of Ti:sapphire at 830 nm with birefringent filter (BF) and multiplate birefringent filter (MBF)

4.3 腔内加入聚焦镜

为了提高聚焦到 LBO 晶体上的峰值功率密度,在腔内我们加入了聚焦镜。分别插入焦距为 15.1 cm 和 10 cm 的凸透镜,虽然蓝光阈值和没有插入腔内凸

透镜时几乎没有变化,但蓝光最大值只有150 mW。效率急剧下降说明过分的聚焦导致了大的双折射和太小的基频光光斑。通过布儒斯特角放置的石英片可以看出垂直偏振的蓝光和水平偏振的蓝光几乎各占50%。

结论 从上面的实验数据可知,基频光的线宽对二次谐波产生效率有很大影响,830 nm的基频光线宽依次为6.2 nm,1.72 nm,0.84 nm时,倍频光的输出功率分别为330 mW,410 mW,410 mW(LBO的允许线宽是4 nm)。但基频光的线宽比允许线宽小很多时,倍频的效率由于饱和因素而不再增加。

对于允许线宽较窄的非线性晶体来说,基频光的线宽对倍频效率的影响更为严重(BBO的允许线宽约为0.25 nm),415 nm的蓝光线宽依次为1.1 nm,0.8 nm和0.7 nm(误差为20%)时,倍频后的紫外激光输出功率分别为8 mW,18 mW和34 mW。

实验通过旋转双折射滤光片来改变基频光波长,发现基频光每增加2 nm,四倍频的效率将增加0.5%。这是由于BBO在210 nm附近的有效非线性系数随波长的变短而迅速下降(如图1所示),因此,用BBO晶体要得到高效的深紫外激光比较困难。

研究证明掺钛蓝宝石激光器在3.6 W的绿光抽运下,得到了平均功率为34 mW、波长为208 nm深

紫外激光,该系统结构简单,易于维护,使用方便。

参 考 文 献

- 1 Kmetec J D, Macklin J J, Young J F. *Short Wavelength Coherent Radiation: Generation and Applications*. In: Bucksbaum P H, Ceglio N M OSA Proc. (OSA, Washington, DC, 1991):176~198
- 2 Rodrigues G, Roberts J P, Taylor A J. Ultraviolet ultrafast pump-probe laser based on a Ti:sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(14):1146~1148
- 3 Rotermund F, Petrov V. Generation of the fourth harmonic of a femtosecond Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13):1040~1042
- 4 Bourzeix S, de Beavoir B, Nez F *et al.*. Ultra-violet light generation at 205 nm by two frequency doubling steps of a cw titanium-sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1997, **133**(2):239~247
- 5 Koechner W. *Solid-State Laser Engineering*. 4th ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996. 470~532
- 6 Liu Jingang, Kim Dalwoo Kim. Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state lasers. *Quant. Electron.*, 1999, **QE-35**(11):1724~1734
- 7 Zou Yinghua. *Laser Physics*. Beijing: Beijing University Press, 1991. 192~203 (in Chinese)
- 8 Nebel A, Bergang R. External frequency conversion of cw mode-locked Ti:Al₂O₃ laser radiation. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(22):1729~1731
- 9 Poirier P, Hanson F. Intracavity frequency doubling of a 2.5 kHz pulsed Ti:Al₂O₃ laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22):1925~1927

Experimental Study of All-Solid-State Second Harmonic and Fourth Harmonic Generation in Ti:Sapphire Laser

Cheng Guanghua Yu Lianjun Wang Yishang Liu Qing Zhao Wei Chen Guofu

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 10 April 2002; revised 27 May 2002)

Abstract: Second harmonic and fourth harmonic are generated by Ti:sapphire laser pumped by a diode laser pumped Q-switched, frequency doubled YLF laser at 527 nm. The nonlinear crystal LBO is used to generate the second harmonic in the Ti:sapphire laser cavity at type I phase match with birefringent filter respectively, and BBO is used to generate ultraviolet laser at 208 nm. The maximum average power of 410 mW at 415 nm, and 34 mW at 208 nm are obtained at 1 kHz repetition rate when the pumping power is 3.6 W. The relations between linewidth of fundamental wave and harmonic efficiency, and wavelength of fundamental wave and fourth harmonic efficiency, the effects of birefringent filter on pulse width and line width of Ti:sapphire laser, and the dependence of line width of Ti:sapphire laser with birefringent filter on pumping power are investigated in theory and experiment.

Key words: Ti:sapphire laser; second harmonic generation; fourth harmonic generation; linewidth; ultraviolet laser