

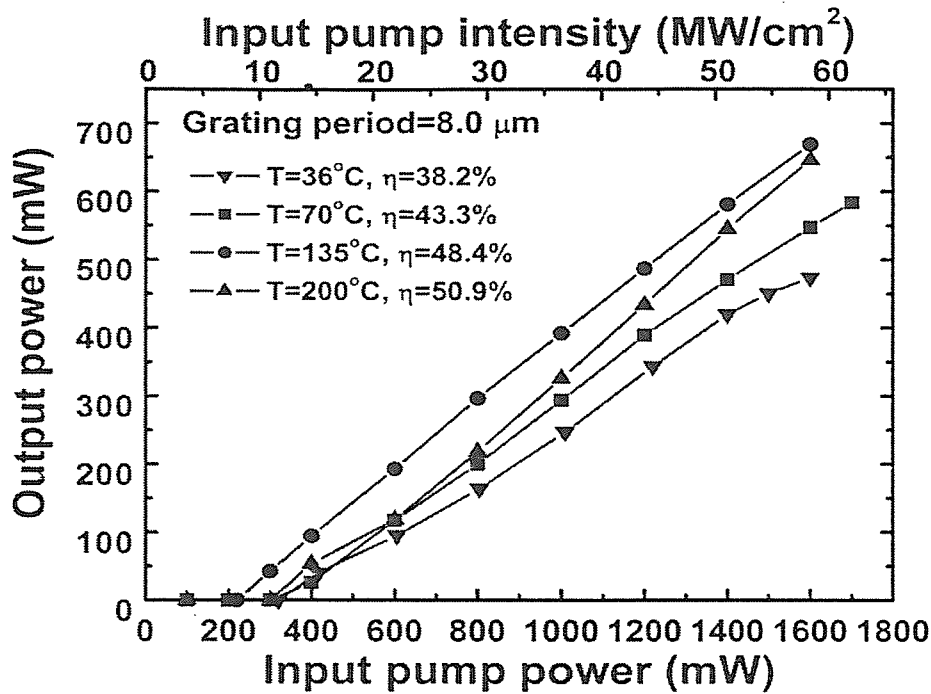


Fig. 3.28 Average signal output power versus input pump power. The corresponding input intensity is shown on the upper scale. The lines between the symbols are for viewing convenience only. η is the power slope efficiency determined by the linear fit of the data.

泵浦光输入条件下，信号光的斜率效率分别是 38.2%、43.3%、48.4%和 50.9%，相应的光子斜率效率 73%、78%、81.7%和 81.9%，这是一个相当可观的转换效率（图 3.28）。一致的高转换效率证明这台 PPMgSLT-OPO 在整个温度区间可以稳定工作，而没有发生光折变损伤或绿光引起的红外吸收现象。与上一节介绍的 PPSLT-OPO^[41]相比，这台 PPMgSLT-OPO 具有更大的工作温度区间、单个周期具有更大的可调谐波长范围，而且对光折变损伤具有更好的抑制。在 50 MW/cm² 的 532 nm 泵浦光输入条件下，测量了出射光的光束质量，在 864 nm 波长时 $M^2 \sim 1.25 \pm 0.1$ ，在 1017 nm 时 $M^2 \sim 1.12 \pm 0.1$ ，接近衍射极限（上一节 PPSLT-OPO 的 M^2 大约是 1.5）。好的光束质量归功于 MgSLT 对光折变的抑制和比较小的温度波动（绿光引起的红外吸收）。

为了得到更大的输出功率，我们更换了泵浦激光器，用一台能够输出 3W（10KHz, 26ns）532 nm 绿光的激光器（Lightwave Electronics 公司 Model M611）

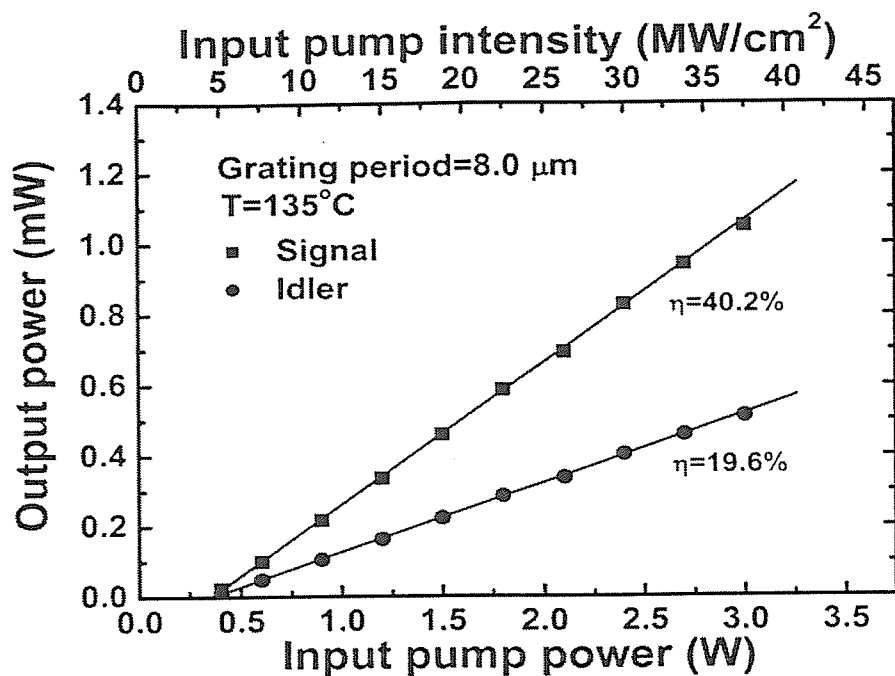


Fig. 3.29 Average signal and idler output power versus input pump power measured with a pump laser of a higher average power. The oven temperature is 135°C , and the signal wavelength is 898 nm .

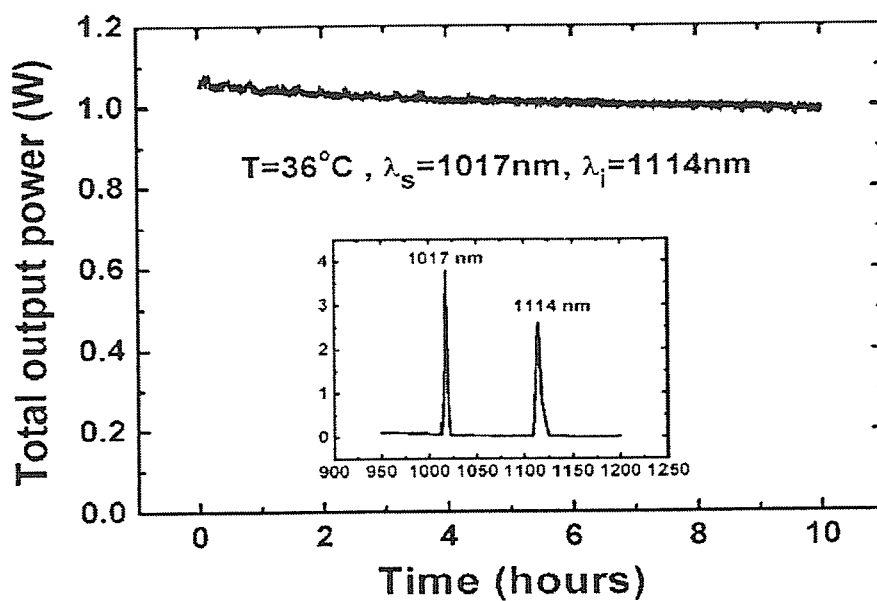


Fig. 3.30 Lifetime test of the OPO near room temperature with the OPO operating near degeneracy. Inset, output signal and idler as recorded by an optical spectrum analyzer. The measured rms power fluctuation with a 3 s averaging time constant is 1.9% .



作为泵浦源。相较于前面使用的 Model 210S ($M^2 < 1.1$) 这台激光器的模式质量稍差 $M^2 = 1.2$ 。但使用这台激光器在 37.5 MW/cm^2 峰值功率密度条件下, 仍然得到了 1 W 的信号光和 1.52 W 的总参量光输出 (图 3.29)。斜率效率不如前面 (图 3.28) 高, 主要是因为两台泵浦激光器的纵模质量的差别造成的。在测量中, 最大输入功率 3 W 情况下, 并没有出现光折变损伤, 但是拆掉谐振腔镜后, 在晶体的出射端面镀膜处发生损伤。

在接近室温 (36°C) 条件下, 测量了 PPMgSLT-OPO 的稳定度 (图 3.30), 信号光和闲置光波长分别是 1017 nm 和 1114 nm , 输出平均功率 $> 1 \text{ W}$, 持续时间 > 10 小时 (脉冲次数 $> 3.6 \times 10^8$), 输出光的功率稳定度非常好, 结果证明 PPMgSLT-OPO 在室温下也能够长时间稳定工作。

本章小节:

利用多通道周期极化超晶格我们研制出多台 OPO 激光器。充分利用各种非线性晶体各自的特性, 使其能够在比较合适的条件下工作, 并得到了从可见光到近、中红外光的可调谐输出, 转换效率最高达到 60% 以上, 获得了很好的实验结果。在对各种 OPO 激光器的工作特性进行了详细测量的同时, 对 MgLN、SLT 和 MgSLT 等非线性晶体的特性, 特别是非线性光学性质进行了评价分析, 为今后的实验工作奠定了基础。



【参考文献】

- [1] 姚建铨 世界科技研究与发展 **5**, 1 (2002)
- [2] J. A. Giordmaine and Robert C. Miller, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 973 (1965)
- [3] 秦莉娟, 周志尧, 包学诚, 现代科学仪器 **1**, 21 (2000)
- [4] 钱世雄, 王恭明, 非线性光学—原理与进展 [M] 上海: 复旦大学出版社, P90 (2001)
- [5] S. J. Broshan and R. L. Byer, *IEEE J. Quan. Elec. QE* **15**, 415 (1979)
- [6] L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg and J. W. Pierce, *J. Opt. Soc. Am. B* **12**, 2102 (1995)
- [7] 姚建铨 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M] 北京: 科学出版社 (1995)
- [8] S. Lin and T. Suzuki, *Opt. Lett.* **21**, 579 (1996)
- [9] K. Mizuuchi, A. Morikawa, T. Sugita and K. Yamamoto, *Jpn. J. Appl. Phys. Part2*, **42**, L90 (2003)
- [10] N. E. Yu, J. H. Ro and M. Cha, *Opt. Lett.* **27**, 1046 (2002)
- [11] N. Pavel, I. Shoji, T. Taira, K. Mizuuchi, A. Morikawa, T. Sugita and K. Yamamoto, *Opt. Lett.* **29**, 830 (2004).
- [12] H. Su, S. C. Ruan, Y. Q. Qin and S. H. Tang, *J. Appl. Phys.* **100**, 053107 (2006).
- [13] D. E. Zelmon, D. L. Small and D. Jundt, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, 3319 (1997)
- [14] 胡小鹏 博士毕业论文 (2007)
- [15] O. Paul, A. Quosig, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke, G. Anstett and J. A. L' Huillier, *Appl. Phys. B.* **86**, 111 (2007)
- [16] L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer and R. L. Byer, *Opt. Lett.* **21**, 591 (1996)
- [17] K. Vodopyanov, *Top. Appl. Phys.* **89**, 141 (2003)
- [18] V. Pruneri, J. Webjörn, P. St. J. Russell and D. C. Hanna, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2126 (1995)
- [19] M. Tsunekane, S. Kimura, M. Kimura, N. Taguchi and H. Inaba, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3414 (1998)
- [20] U. Strussner, A. Peters, J. Mlynek, S. Schiller, J. P. Meyn and R. Wallenstein, *Opt. Lett.* **24**, 1602 (1999)



- [21] K. Kitamura, Y. Furukawa, V. Gopalan and T. E. Mitchell U.S. patent 6211999 (2001)
- [22] X. P. Hu, X. Wang, J. L. He, Y. X. Fan, S. N. Zhu, H. T. Wang, Y. Y. Zhu and N. B. Ming, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 188 (2004)
- [23] M. Katz, R. K. Route, D. S. Hum, K. R. Parameswaran, G. D. Miller and M. M. Fejer, *Opt. Lett.* **29**, 1775 (2004)
- [24] A. G. Getman, S. V. Popov and J. R. Taylor, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3026 (2004)
- [25] T. Hatanaka, K. Nakamura and T. Taniuchi, *Opt. Lett.* **25**, 651 (2000)
- [26] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura and K. Kitamura, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1662 (2004)
- [27] A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, P. Blau and M. Katz, *Opt. Lett.* **28**, 194 (2003)
- [28] Y. S. Kim and R. T. Smith, *J. Appl. Phys.* **40**, 4637 (1969)
- [29] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science, 1986), P.706.
- [30] S. Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao, S. N. Zhu, S. Kurimura and K. Kitamura *Opt. Lett.* **31**, 3632 (2006)
- [31] C. S. Yu and A. H. Kung, *J. Opt. Soc. Am. B.* **16**, 2233 (1999)
- [32] Z. D. Gao, S. Y. Tu, S. N. Zhu, and A. H. Kung, *CLEO-PR 2005*
- [33] S. J. Brosnan and R. L. Byer, *IEEE J. Quantum Electron.* **15**, 415 (1979)
- [34] M. G. Littman, *Opt. Lett.* **3**, 138 (1978)
- [35] S. G. Dinev, I. G. Koprnikov, K. V. Stamenov and K. A. Stankov, *Appl. Phys.* **22**, 287 (1980)
- [36] N. D. Hung and P. Brechignac, *Opt. Commun.* **54**, 151 (1985)
- [37] I. Shoshan, N. N. Danon and U. P. Oppenheim, *J. Appl. Phys.* **48**, 4495 (1977)
- [38] T. D. Raymond, P. Esherick and A. V. Smith, *Opt. Lett.* **14**, 1116 (1989)
- [39] K. W. Kangas, D. D. Lowenthal and C. H. Muller III, *Opt. Lett.* **14**, 21 (1989)
- [40] W. R. Bosenberg and D. R. Guyer, *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1716 (1993)
- [41] S. Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao and S. N. Zhu, *Opt. Lett.* **30**, 2451 (2005)
- [42] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura and K. Kitamura, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5134 (2004)
- [43] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura and K. Kitamura, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **43**,



1265 (2004)

- [44] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura and K. Kitamura, *Mater. Sci. Eng. B* **120**, 146 (2005)



第四章 光学参量振荡方法获得 红绿蓝三色激光器

从黑白到标清再到 1080p 高清晰度,从显象管到平板电视再到正面投影仪……20 年间,显示技术以惊人的速度在家庭中实现了更新换代。那么,下一代显示技术是什么?非常一直的答案是激光显示^[1]技术(LDT)。自激光问世以来,科技工作者就试图将激光应用于显示。自从 1965 年美国 ZENITH 无线电公司研制出了第一台激光彩色显示器^[2]以来,激光显示技术已经发展了几十年,由于早期的大功率红、绿、蓝三色激光器为气体激光器,体积过于庞大,无法做成实用的显示系统,只能在原理上开展研究。随着激光技术的不断发展,激光显示方法已愈受重视。近年来,国内外已成立了多家专门公司和研究机构对此进行研究开发。随着全固态激光器技术取得突飞猛进的发展,相继开发出体积小、功率高的瓦级以上的红、绿、蓝(RGB) DPL(diode pump laser)全固态激光器,这就为发展激光视频显示奠定了基础。

现有的显示器色彩重现能力很低,其显色范围仅能覆盖人眼所能观察到的色彩空间的 33%,而其他 67%的色彩空间是数字显示技术和现有的显示技术都无法重现的^[3](图 4.1)。由于激光单色性好,色纯度极高,按三色合成原理,它在色度图上形成的色三角区域最大,因而与现有其他显示方法(CRT—阴极射线管、LCD—液晶电视、PDP—等离子电视和背投电视等)相比具有不可替代的优势,即拥有更大的色域、更高的亮度、对比度和色饱和度,颜色更加鲜艳亮丽、更能反映自然界的真实色彩。因此,利用激光实现彩色显示引起人们的极大兴趣,成为当前一个十分活跃的研究领域。

据德国激光显示公司预测,到 2010 年激光电视年销售额将达 570 亿美元,在多元化的电视产品中,将占有非常大的市场份额。而 RGB 三色激光器则是激光显示系统中的关键环节。为了降低成本,减小外形尺度,以及获得高集成度,都希望不同颜色的激光能出自同一个独立的激光系统。过去,人们在 RGB 三色光同时输出方面已经做过许多尝试^[4-9]。通过计算显示 2 平方米的面积,需要 1000 流明(lm)或平均功率 10W 的 RGB 激光^[10]。目前用来实现 RGB 三色激光的方



法一般是使用多台激光器的倍频^[7,9,11,12],或是通过一台高功率激光器经过多个频率转换过程得到。这些方法都是通过组合多个线性或非线性光学元件来组成一个复杂的光学系统来实现目标。在这方面,可以用 DPL 输出红外激光,配合介电体光学超晶格进行非线性频率转换,这样构成的系统具有较大的优越性。

我们实验室在应用超晶格进行频率转换方面已经进行了多年的研究,积累了丰富的经验,在 RGB 三色光输出方面也进行了很多的尝试,利用双谐振红外激光器作为泵浦源,使用串连结构超晶格为变频晶体,通过两个 SHG 和一个 SFG 过程,在一定温度范围内得到 RGB 三色光同时输出,通过温度调节的方法改变 RGB 光的功率配比,可以得到准白光输出。

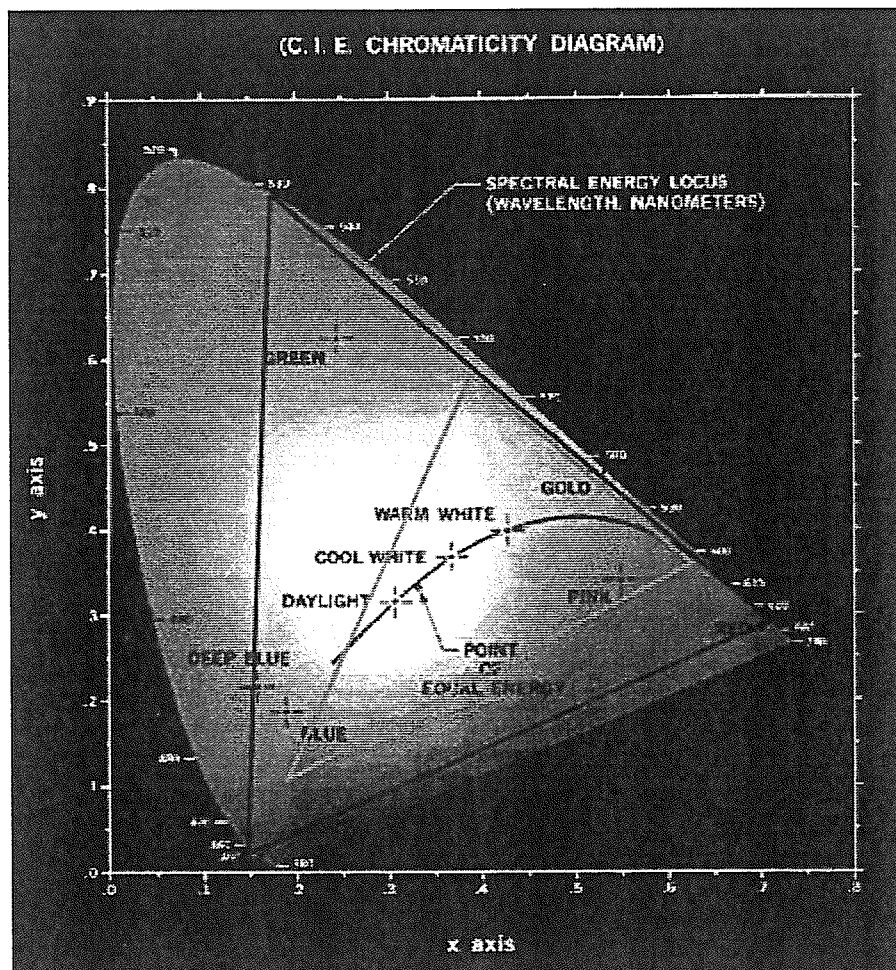


Fig. 4.1 Color space of LDT vs CRT

在前人工作的基础上,结合目前的非线性材料和半导体全固态激光技术的发展,我们研制出一种结构紧凑、调节简单、造价低廉的 RGB 三色激光器,用光学参量振荡的方法实现高转换效率的 RGB 三色光的同时输出。



§ 4.1 级联 PPSLT-RGB 三色激光器

本节介绍的 PPSLT-RGB 激光器以 532 nm 绿光为泵浦光源,通过级联 PPSLT 晶体,利用第一个周期实现 OPO 过程将输入的泵浦光转换为信号光(红光)和闲置光(红外光),用后面的周期实现 SFG 过程,将泵浦光和闲置光和频产生蓝光,加上剩余的泵浦绿光,实现了 RGB 三色光的同时输出。因为剩余绿光是作为出射 RGB 光的一支,在闲置光全部转换为蓝光的情况下,理论转换效率可以达到 100%。

选择 PPSLT 作为变频晶体,PPSLT 在可见光和红外光区已经有很成功的应用(SHG、SFG 和 OPO)^[13-19]。将两个周期结构级联在同一块晶体上作为频率转换介质,工作温度设计在 160℃(避免光折变的影响),以 532 nm 绿光为泵浦源,通过 OPO 过程得到红光(633 nm)和中红外光(3342 nm),再通过 SFG 过程实现 532 nm 绿光 and 3342 nm 中红外光的和频产生蓝光(459 nm)。利用上一章介绍的 SLT Sellmeier 方程(式 3.9)^[20]、能量守恒(式 3.1)、动量守恒(式 3.4)和 LT 热膨胀方程(式 3.10),计算得到 OPO 过程周期为 11.7 μm , SFG 过程周期为 8.5 μm 。实验中使用 PPSLT 样品尺寸为 35 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1 mm (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)。前面一段(周期 11.7 μm)长度是 22 mm,后面一段(周期 8.5 μm)长度 13 mm。PPSLT 样品两个端面进行了光学抛光,平行度误差 $< 10'$ 。在入射和出射端面分别镀膜,入射端: 532 nm ($R < 1\%$); 633 nm ($R > 99\%$),出射端: 532 nm ($R < 1\%$); 459 nm ($R < 1\%$); 633 nm ($R \sim 65\%$),利用在 PPSLT 样品两个端面镀膜的方法,使两个端面代替 OPO 腔镜构成谐振腔,腔长就是样品的长度,使系统得到简化,降低了成本,调节也更方便,因为腔长缩短,OPO 的效率也得到了提高。PPSLT 样品本身就成为一个 OPO 和 SFG 合成的结构简单的频率转换器。

实验用的泵浦光源是由一台 Lightwave Electronics 公司生产的二极管泵浦 Nd:YAG 激光器(Model 210S)产生的 1064nm 激光,经过一块 Type II KTP 倍频晶体,在 4KHz 重复频率产生 1 W 532 nm 倍频绿光,脉冲宽度 25 ns。用一个焦距为 150 mm 的透镜将 532 nm 绿光聚焦到 PPSLT 样品中,高斯光束束腰为 165 μm ,在 1 W 平均功率输入情况下,对应的样品中心峰值功率密度约 23 MW/cm²。

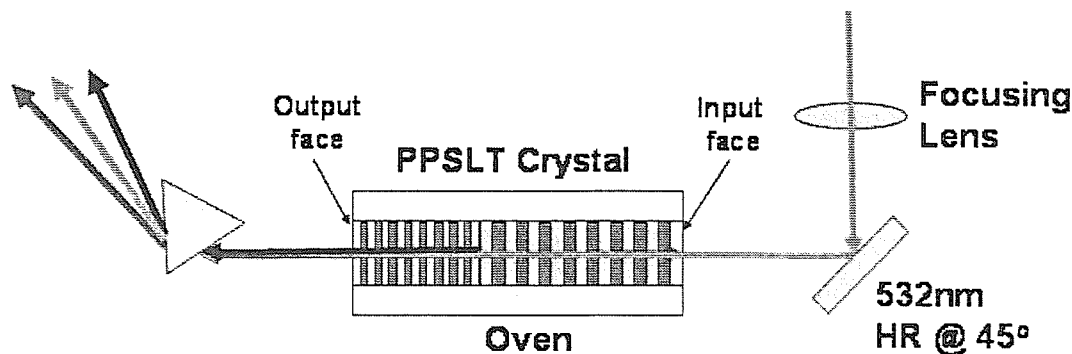


Fig. 4.2 Schematic showing generation of three basic colors in a single crystal. 532nm light is incident from the right. The three colors are dispersed by a prism exiting to the left. The columns in the PPSLT crystal depict two superlattices with a different domain periodicity.

PPSLT 晶体放在一个温度控制精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的控温炉中以得到稳定的功率输出。用一个 Pellin Broca 棱镜实现出射光束的分离。用热敏功率探头来测量平均功率。图 4.2 是 PPSLT-RGB 三色激光器的架构示意图。

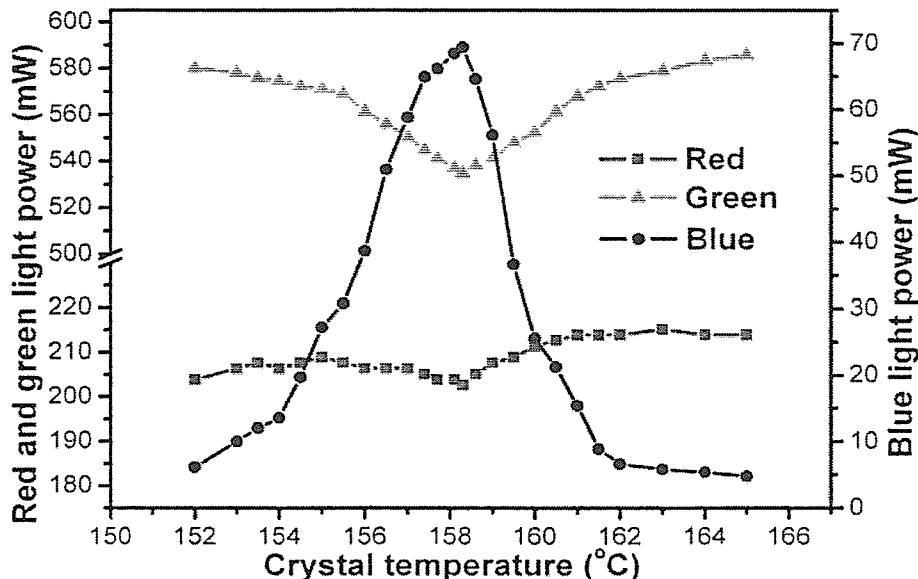


Fig. 4.3 Average power of the red, green, and blue lights as a function of the sample temperature.

PPSLT 样品温度设定在 165°C ，在入射功率大于 350 mW (8 MW/cm^2) 时发生共振。在输入功率达到 1 W 时信号光（红光）平均功率达到 214 mW ，斜率效



率约等于 30%，这个结果低于前面介绍的 PPSLT-OPO^[18]，原因可能是样品两个端面（即腔镜）的平行度不可调。在 1 W 输入泵浦光的情况下，输出的 RGB 三色光平均功率随着 PPSLT 温度的改变而变化，图 4.3 给出了样品温度从 152℃ 到 165℃ 输出功率的变化情况。在这个温度变化范围内，红光的平均功率变化不大，只是波长变化 0.5-1 nm，以满足 QPM 条件^[18]。蓝光最强发生在 158.3℃，即 SFG 过程效率最高，SFG 过程不同于 OPO 过程，它对温度的变化还是比较敏感的，SFG 过程的温度半高宽约是 3.8℃，非常接近理论计算的 3℃。最大输出蓝光功率是 69.4 mW，波长是 459 nm。在 158.3℃ 时，蓝光功率非常稳定，所以 PPSLT 在这样的蓝光功率密度下是可以长时间稳定工作的^[19]。在蓝光输出最大时，出射的绿光功率大约下降了 8.7%，红光功率大约下降了 5%，原因是蓝光是由绿光和闲置光的和频产生的，所以绿光会在蓝光增加时减少，同时在 OPO 过程中闲置光的减少必然引起了信号光（红光）功率的降低。图 4.3 是输出光经过棱镜分光后得到的 RGB 三色光束和光斑图。光束的稳定性和光斑的形状都非常好，这对激光显示是非常重要的。

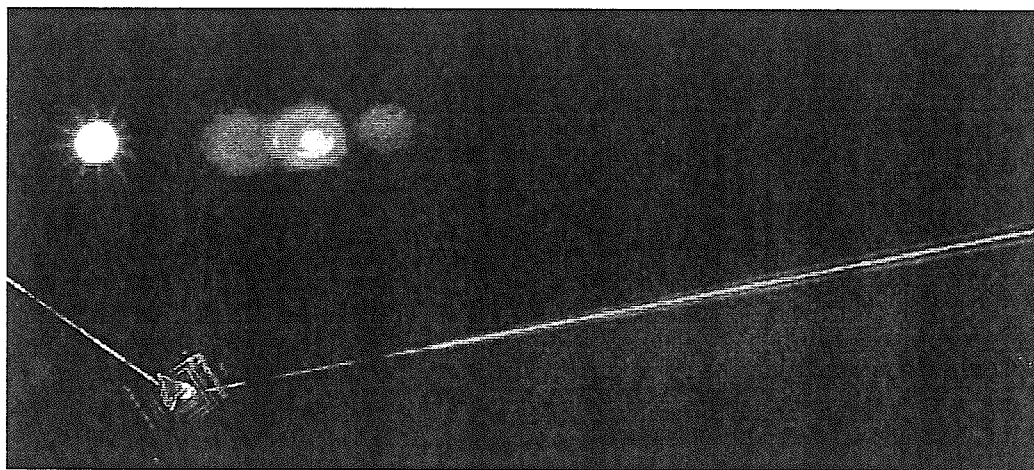


Fig. 4.4 Generated white light from the left is incident onto a prism which disperses the light into three colored beams. On top are pictures of the beams terminated on a piece of paper, from left: white, red, green, and blue.

在提高输入光功率以得到更高转换效率时，发生了光折变损伤和出射光束扭曲的现象，这主要是受到了极化图案中间有缺失的影响，在文献 18 中峰值功率密度 60 MW/cm² 下并没有发生损伤。通过改善极化质量相信可以得到更高的



转换效率和更高的输出功率。

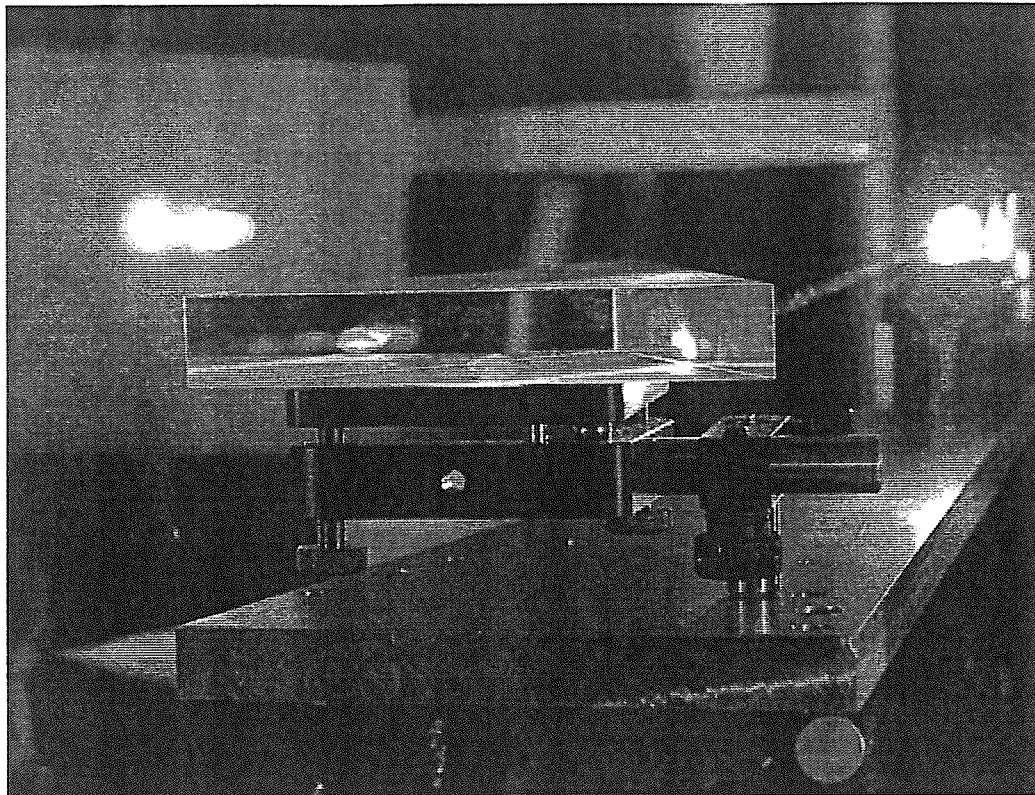


Fig. 4.5 Beautiful red, green, and blue faculas on the prism

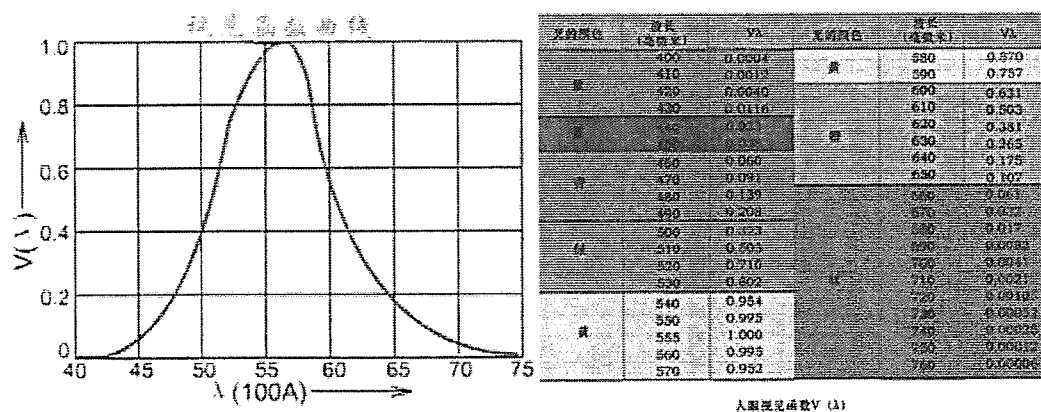


Fig. 4.6 Visibility Function

从上面测量的 RGB 三色光的平均功率，根据 CIE 色度学原理^[21]，可以计算相应的白光量。以最低的蓝光功率（69.4 mW）为初始值，计算得到 304 mW 等能量白光（R: 140 mW, G: 94.3 mW, B: 69.4 mW），对应色温是 5800 K，这意味着要想得到等能量的白光必须滤掉部分输出的红光和绿光。



激光显示中，最重要的两个参数：显色范围和亮度，前者决定了显示的能力，后者决定了显示的效果。这台 SLT-RGB 激光器其可显色范围覆盖了人眼所能观察到的色彩空间的 66.5%（图 4.1 中的黑色三角形区域），是现有的显示器（图 4.1 中的灰色三角形区域）的两倍。

视觉亮度可以用光通量（即视觉亮度）公式

$$\phi = 683 \int P_{\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

计算，其中 ϕ 为总的光通量，是若干波长的光通量积分和， P_{λ} 是某个波长光的平均功率，可以通过测量得到， V_{λ} 是视见函数，不同波长视见函数不同（图 4.6）。计算得到 304 mW 等能量白光的亮度是 80 lm。所以输入到输出等能量白光的转换效率是 80 lm/W，能量转换效率约 30%。如果利用全部的输出红光和蓝光加上部分的绿光，可以得到准白光（CIE 色度中的 cool white light）408mW（R: 203mW，G: 146mW，B: 69.4mW），亮度是 114 lm，对应的色温是 4850K。

Beam waist	145 μm	165 μm	180 μm
Peak Intensity	30 MW/cm ²	23 MW/cm ²	19 MW/cm ²
Blue Power	54.7 mW	69.4 mW	58.7 mW
Red Power	249 mW	202 mW	189 mW
White light Power (0.33,0.33)	240 mW	304 mW	256 mW
Quasi-white light power	454 mW (0.4, 0.4: Warm White)	407 mW (0.36, 0.37: Cool White)	368 mW (0.36, 0.38: Cool White)

Table 4.1 Red, Blue, White and Quasi-white light power from different input beam waist

测量了不同泵浦光束腰条件下输出红光和蓝光平均功率，以及以此来计算等能量白光和准白光功率（表 4.1）。在泵浦光输入功率 1 W 的情况下，等能量白光最大输出 304 mW（80 lm），准白光最大输出 454 mW（129.5 lm），分别对应图 4.7 中的 Point of Equal Energy 和 Warm White 点，属于白光和准白光区域。

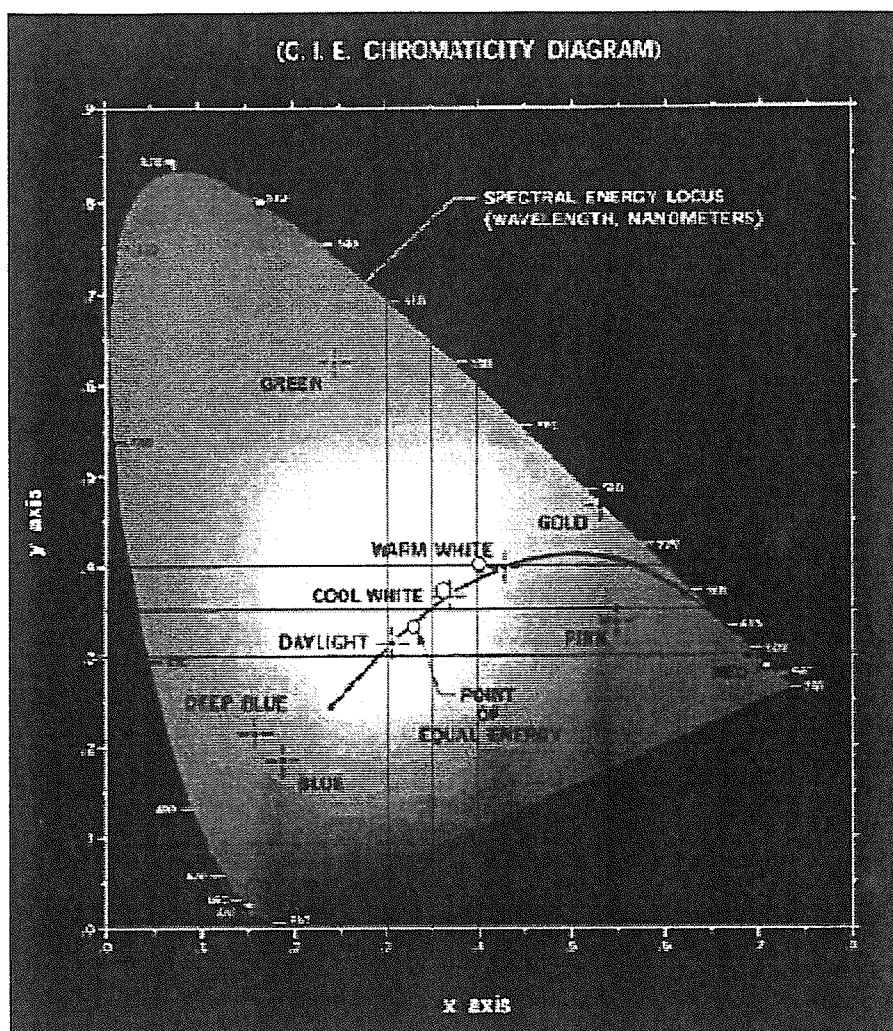


Fig. 4.7 The white light and quasi-white light's position in CIE chromaticity diagram (white point)

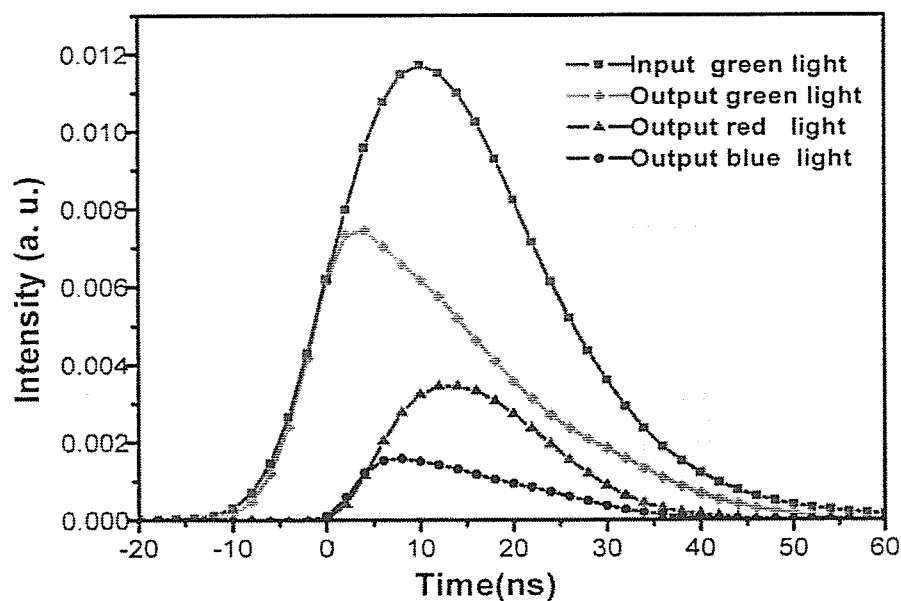


Fig. 4.8 Temporal profile of the input green pulse and the output RGB pulses. Each trace is the average of 16 pulses.



图 4.8 是输入绿光和输出 RGB 光在时域上的脉冲情况。各个脉冲使用相同的 Si 探头 (EOT model 2000, 时间分辨率 0.5ns) 进行测量, 测量结果平均了 16 个脉冲, 一台数字示波器用来记录 (Tektronix 235)。入射的绿光有很好的高斯光形状, 脉冲宽度是 25 ns。红光脉冲延迟入射光 12 ns 出现, 即入射脉冲能量达到 OPO 阈值时。作为入射绿光与 OPO 过程中的闲置光和频产生的蓝光是在红光出现的同时出现的。第四个脉冲是出射的剩余绿光, 可以看到相较于入射绿光脉冲, 在红光和蓝光出现以后, 它的高度明显降低了。

	Wavelength (nm)	Power (mW)	Lumious fulx (lm)	Color space	conversion efficiency
Li's Work Quasi-white	R: 671	477	10	71.5%	11.7%
	G: 532	21	12.1		
	B: 447	32	2.7		
	Total:	530	24.8		
Hu's Work Quasi-white	R: 660	780	32.5	71%	20%
	G: 532	146	84.3		
	B: 440	84	1.3		
	Total:	1010	118.1		
This work White light	R: 633	140	22.85	66.5%	30.4%
	G: 532	94.3	54.3		
	B: 459	69.4	2.75		
	Total:	304	80		
This work Quasi-white	R: 633	249	40.6	66.5%	45.4%
	G: 532	150.3	86.7		
	B: 459	54.7	2.2		
	Total:	454	129.5		

Table 4.2 Compare between this work and prevenient works

我们实验室在 RGB 三色激光器研究方面已经做了很多出色的工作, 用表格 4.2 将 OPO 和 SFG 方法得到 RGB 实验结果与前面的一些工作进行了比较, 这



台 PPSLT-RGB 激光器具有以下优点：对泵浦激光器要求不高，现在市场上高功率 532 nm 激光器有很好的产品，容易得到；对温度敏感度不高，不存在多个 SHG 和 SFG 过程的温度失配问题；从泵浦光到白光和准白光的转换效率高；亮度高。缺点：对晶体表面镀膜要求高，增加了成本；其显色范围覆盖的色彩空间相对于前面两个工作略有降低。

§ 4.2 准周期 MgSLT-RGB 三色激光器

上一节中，介绍了级联 PPSLT-RGB 激光器，得到了很好的实验结果。但其白光的转换效率受限于蓝光转换效率，由于蓝光的转换效率低，所以导致白光和准白光的效率不能达到理论的 100% 或比较高的水平，而且只能在高温条件下（130℃ 以上）工作。本节介绍对 PPSLT-RGB 激光器进行的两项改进。

首先选择 MgSLT 作为变频晶体，它的性质前面章节已经做过介绍，相比 SLT，MgSLT 的光折变损伤阈值更高，可以提高输入泵浦光功率密度，提高转换效率，以得更高的输出功率。另一个优点是 MgSLT 可以工作在室温而不会受光折变现象的影响。

其次是改进超晶格结构，引入准周期超晶格。上面一节实验中限制白光转换效率的是蓝光的输出功率，通过准周期对倒格矢的灵活调节，在保证红光效率的同时，提高蓝光效率。

下面对准周期结构做简单介绍：

二组元准周期^[22]光学超晶格结构由图 4.9 (a) 中所示 A、B 两个基元排列而成，每个基元由一对正负畴构成。设定 A、B 基元中的正畴宽度相等，用 l 表示^[23]。理论计算准周期结构的倒格矢可以写作如下形式：

$$G_{m,n} = 2\pi \frac{m + n\tau}{D}, \quad (4.2)$$

每个倒格矢对应的傅立叶系数为：

$$g_{m,n} = 2(1 + \tau) \frac{l}{D} \sin c\left(\frac{G_{m,n}l}{2}\right) \sin c(X_{m,n}) \quad (4.3)$$

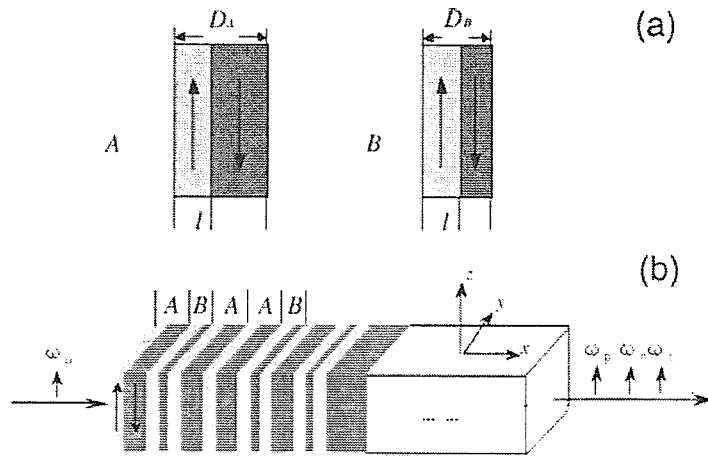


Fig. 4.9 QPOS made from a MgSLT crystal. The arrows indicate the directions of spontaneous polarization. (a) Two building blocks, A and B, each composed of one positive and one negative ferroelectric domain. (b) Schematic diagram showing a QPOS composed of two blocks, A and B, arranged in quasi-periodic sequence and the polarization orientation of electric fields in these two parametric processes with respect to the superlattice.

其中参数 $D = \tau D_A + D_B$ ， D_A 和 D_B 就是结构单元 A 和 B 的宽度。

我们设计了一个准周期结构替代 $11.7 \mu\text{m}$ 和 $8.28 \mu\text{m}$ 两个周期结构，对应的倒格矢分别为 $\Delta k_1 = 0.537024$ ， $\Delta k_2 = 0.758564$ ，使用准周期结构中的倒格矢 $G_{1,1}$ 匹配 Δk_1 ， $G_{1,2}$ 匹配 Δk_2 ，计算结果： $g(G_{1,1}) \times g(G_{1,2})$ 达到最大值时， $\tau = 0.70222$ ， $D = 19.91597$ ，此时 $g(G_{1,1}) = 0.417278$ ， $g(G_{1,2}) = 0.356189$ ， $D_A = 14.86 \mu\text{m}$ ， $D_B = 9.481 \mu\text{m}$ ， $l = 4.72 \mu\text{m}$ 。这样一个准周期结构即可实现级联周期的 OPO 和 SFG 两个过程，在 50°C 得到 R: 640.5 nm ，G: 532 nm ，B: 455 nm 。用长度为 $l_1 = 3 \text{ cm}$ 的准周期结构同相同长度级联的周期结构（OPO: $l_2 = 2 \text{ cm}$ ；SFG: $l_3 = 1 \text{ cm}$ ）做理论比较，周期结构傅立叶系数 $g(G_1) = 0.63662^{[24]}$ 。在其它条件相同的情况下，OPO 效率比，准周期：级联周期 $= g^2(G_{1,1}) \times l_1^2 / (g^2(G_1) \times l_2^2) = 0.97$ ；SFG 效率比，准周期：级联周期 $= g^2(G_{1,2}) \times l_1^2 / (g^2(G_1) \times l_3^2) = 2.82$ 。可以看出在 OPO 效



率几乎一样的情况下，准周期结构 SFG 产生蓝光的效率要提高很多。

经过实验测量蓝光峰值出现在 47°C 左右，具体实验还在进行中，希望能够提高白光转换效率验证理论计算结果。

本章小节：

利用级联 PPSLT 超晶格为变频晶体，采用 532 nm 为泵浦光源，同时实现 OPO 和 SFG 两个变频过程，获得 RGB 三基色激光的同时输出。其显色范围覆盖人眼所能观察到的色彩空间的 66.5%，是目前显示器的两倍。从泵浦光到白光的转换效率达到 30%，准白光的转化效率 45%，亮度分别是 80 和 129.5 lm，是目前已知从泵浦光到白光和准白光转换效率最高的。利用光参量方法实现 RGB 激光器对温度不敏感，避免了温度失配的问题。由于蓝光效率是目前这台 RGB 激光器的一个瓶颈，利用准周期 MgSLT 结构在保证红光效率的基础上，提高蓝光转换效率的实验正在进行，希望能进一步提高白光的转换效率，研制出室温下白光或准白光激光器。



【参考文献】

- [1] 刘榴娣, 常本康, 党长民, 显示技术 [M] 北京: 理工大学出版社 (1993)
- [2] A. Korpel, R. Adler, P. Desmares and W. Watson, *Appl. Opt.* **5**, 1667 (1966)
- [3] E. J. Lerner, *Laser Focus World*, **5**, 91 (2002)
- [4] P. Baldi, C. G. Trevifio-Palacios, G. I. Stegeman, M. P. D. Micheli, D. B. Ostrowsky, D. Delacourt and M. papuchon, *Elec. Lett.* **31**, 1350 (1995)
- [5] S. S. Yap, W. O. Siew, T. Y. Tou and S. W. Ng, *Appl. Opt.* **41**, 1725 (2002)
- [6] D. Japue, J. Capamny and J. Garcia Solé, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 325 (1999)
- [7] J. Capamny, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 144 (2001)
- [8] J. J. Romero, D. Jaque, J. García Solé and A. A. Kaminskii, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4106 (2002)
- [9] J. Liao, J. L. He, H. Liu, H. T. Wang, S. N. Zhu, Y. Y. Zhu and N. B. Ming, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3159 (2003)
- [10] S. Kubota, *Opt. Photonics News* **13**, 50 (2002)
- [11] H. X. Li, Y. X. Fan, P. Xu, S. N. Zhu, P. Lu, Z. D. Gao, H. T. Wang, Y. Y. Zhu, N. B. Ming and J. L. He, *J. Appl. Phys.* **96**, 7756 (2004)
- [12] A. Brenier, C. Y. Tu, Z. J. Zhu and B. C. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2034 (2004)
- [13] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura and K. Kitamura, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **43**, 1265 (2004)
- [14] A. G. Getman, S. V. Popov and J. R. Taylor, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3026 (2004)
- [15] X. P. Hu, X. Wang, J. L. He, Y. X. Fan, S. N. Zhu, H. T. Wang, Y. Y. Zhu and N. B. Ming, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 188 (2004)
- [16] A. Bruner, D. Eger and S. Ruschin, *J. Appl. Phys.* **96**, 7445 (2004)
- [17] M. Katz, R. K. Route, D. S. Hum, K. R. Parameswaran, G. D. Miller and M. M. Fejer, *Opt. Lett.* **29**, 1775 (2004)
- [18] S. Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao and S. N. Zhu, *Opt. Lett.* **30**, 2451 (2005)
- [19] S. Kurimura, S. Tovstonog, R. Watanabe and K. Kitamura, *CLEO*, paper No. CML3 (2006)
- [20] A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, P. Blau and M. Katz, *Opt. Lett.* **28**, 194 (2003)



- [21] 周太明, 周详, 蔡伟新, 光源原理与设计 [M] 上海: 复旦大学出版社 (2006)
- [22] R. K. P. Zia and W. J. Dallas, *J. Phys. A* **18**, 341(1985)
- [23] Y. Du, S. N. Zhu, Y. Y. Zhu, P. Xu, C. Zhang, Y. B. Chen, Z. W. Liu and N. B. Ming, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1573 (2002)
- [24] S. N. Zhu, Y. Y. Zhu and N. B. Ming, *Science* **278**, 843 (1997)



第五章 结论

本论文从光学超晶格的制备出发，成功的实现 PPSLT 和 PPMgSLT 的室温极化。在此基础上研究了 532 nm 和 1064 nm 泵浦 QPM-OPO 的工作特性，对 SLT 和 MgSLT 的光学特性进行了多项测试，并用 OPO 方法研制了一台高效率的 RGB 激光器。以下是对论文工作进行简要总结：

1. 利用外加脉冲电场的方法成功在室温下制备出周期、准周期 SLT 和 MgSLT 样品，通过调节模板的占空比、控制极化电压和极化电流实现多周期极化中占空比的优化，成功制备了 7 通道不同周期占空比都接近 1:1 的 PPMgSLT 样品，对超晶格在 OPO 和多个变频过程中的应用有重要意义。

2. 以 1064 nm 激光器为泵浦源，利用多周期极化 MgLN 晶体实现了近、中红外光区的全固态 OPO。得到信号光调谐范围从 1.44 μm 到 1.58 μm ，闲置光从 3.28 μm 到 4.11 μm 。红外可调谐光源在光谱学、医学、非线性光学、大气研究、军事国防等研究领域都有重要应用。

3. 以 532 nm 绿光激光器为泵浦源，利用 SLT 晶体所具有的较高抗光折变损伤性能，成功研制了一台 PPSLT-OPO，实现可见光到中红外波长的调谐输出，并可通过改变谐振腔的结构来满足不同的应用需求。该激光器具有高效、方便、环保、耐用、成本低和调节简便等优点，可以应用于激光光谱学、物理化学、生物科学研究和生物显微成像等方面。

4. 利用 MgSLT 晶体比 SLT 晶体更好的抗光折变损伤性能，对 PPSLT-OPO 激光器进行改进，以 532 nm 绿光激光器为泵浦源，在单个周期 MgSLT 晶体上实现从 855 nm 到 1410 nm 的连续可调谐，转换效率超过 60%，输出信号光功率达到 1 W。在此基础上，利用 7 通道 PPMgSLT 可以实现 644 nm 到 3045 nm 的连续可调谐输出，实验正在进行中。



5. 在 SLT-OPO 基础上, 以 532 nm 激光为泵浦源, 采用级连周期 SLT 结构, 通过 OPO 和 SFG 过程, 获得了 RGB 三基色光的的同时输出。其显色范围覆盖人眼所能观察到的色彩空间的 66.5%, 是现有的显示器的两倍。泵浦光到白光的转换效率达到 30%, 准白光的转换效率大于 45%, 亮度分别达到 80 和 129.5 lm。该技术成功避免了多个 SHG 和 SFG 过程中出现的温度失配问题。

6. 设计了利用准周期 MgSLT 来实现 RGB 三色激光器的实验。该激光器与级连周期 SLT-RGB 激光器相比, 能进一步提高白光的转换效率, 并具有在室温下稳定工作的优点。



附 录

作者在攻读博士学位期间发表和待发表的论文

1. A monolithic red-green-blue laser light source based on cascaded wavelength conversion in periodically-poled stoichiometric lithium tantalate, *Applied Physics Letters*, **89** 181101, 2006 (Cover page article)
Zhida Gao, Shi-ning Zhu, Shih-Yu Tu and Andrew H. Kung
2. Etching study of poled lithium tantalate crystal using wet etching technique with ultrasonic assistance, *Optical materials* (Send to production)
Zhida Gao, Qianjin Wang, Yong Zhang, Shi-ning Zhu
3. Galvanic Deposition of Nanostructured Noble-Metal Films on Silicon, *Electrochemical and Solid State Letters*, **8**, C148-C150, 2005,
Yan-Yan Song, Zhida Gao, John. J. Kelly, and Xing-Hua Xia
4. Efficient periodically poled stoichiometric lithium tantalate optical parametric oscillator for the visible to near-infrared region, *Optics Letters* **30**, 2451, 2005
Shih-Yu Tu, Andrew H. Kung, Zhida Gao, and Shi-ning Zhu
5. Green-pumped high power optical parametric oscillator based on periodically-poled MgO-doped stoichiometric LiTaO₃, *Optics Letters* **31**, 3632, 2006
Shih-Yu Tu, Andrew H. Kung, Zhida Gao, Shi-ning Zhu, Sunao Kurimura and Kenji Kitamura
6. Nonlinear Čerenkov radiation in a hexagonally poled LiTaO₃ waveguide *Physical Review Letters* (submitted)
Yong Zhang, Zhida Gao, Zhen Qi, and Shi-ning Zhu
7. Multiple-channel mid-infrared optical parametric oscillator in periodically poled MgO:LiNbO₃ *Journal of Applied Physics* (submitted)
H. C. Guo, Zhida Gao, Y. Q. Qin, S. N. Zhu, Y. Y. Zhu, S. H. Tang
8. Study of optical elastic scattering in a quasiperiodically poled LiTaO₃ crystal *Journal of Applied Physics*, **101**, 056104, 2007
Zhenda Xie, Gang Zhao, Ping Xu, Zhida Gao, Shining Zhu
9. Experimental studies of enhanced Raman scattering from a hexagonally poled LiTaO₃



crystal *Physical Review B* 72 064307, 2005

Ping Xu, Shi-ning Zhu, Xiaoqiang Yu, Shuaihua Ji, Zhida Gao, Gang Zhao, Yongyuan Zhu, Naiben Ming

10. 530-mW quasi-white-light generation using all-solid-state laser technique *Journal of Applied Physics* 96, 7757, 2004

Hongxia Li, Yaxian Fan, Ping Xu, Shi-ning Zhu*, Peng Lu, Zhida Gao, Huitian Wang, Yongyuan Zhu, and Naiben Ming

11. All-solid-state red and green laser by temperature tuning *Journal of Physics D: Applied Physics, Rapid Communication* 37 L21-L24, 2004

Hongxia Li, Ping Xu, Ya-xian Fan, Peng Lu, Zhida Gao, Sheng Liu, Shi-ning Zhu, and Jinliang He



作者在攻读博士学位期间申请的专利

美国专利：

1. 名称：High rep rate visible OPO

申请时间：2005. 12. 23

申请号：11318234

申请人：A. H. Kung, Shining Zhu, Shih-Yu Tu, Zhida Gao

2. 名称：Laser display radiation source and method

申请时间：2006. 4. 7

申请号：11407532

申请人：A. H. Kung, Zhida Gao, Shih-Yu Tu, Shining Zhu

中国专利：

3. 名称：以化学计量比钽酸锂超晶格为变频晶体的高重复频率可见光光学参量振荡激光器

申请时间：2006. 3. 14

申请号：200610038806.5

申请人：祝世宁 高志达 章晨 孔庆昌 涂时雨

4. 名称：红绿蓝彩色激光显示光源的制备方法

申请时间：2006. 4. 7

申请号：11407532

申请人：高志达 祝世宁 涂时雨 孔庆昌

台湾专利：

5. 名称：可见光光学参数共振器

申请时间：2005. 11. 21

申请号：94140768

申请人：孔庆昌 祝世宁 涂时雨 高志达

6. 名称：红绿蓝三色雷射投影机光源

申请时间：2006. 5. 29

申请号：95118965

申请人：孔庆昌 高志达 涂时雨 祝世宁



致 谢

本论文是在导师祝世宁教授的精心指导下完成的。五年多来，导师渊博的学识、严谨的治学态度、活跃的学术思想、开放的科研思路和忘我的工作精神使我受益匪浅。在学术上，为我提供了自由的学术氛围，循循善诱；生活上，给予无微不至的关怀。不论是做学问还是做人，都为我树立了高尚的榜样。在此，谨向恩师致以最诚挚的感谢和最崇高的敬意！

在攻读博士学位期间，台湾中央研究院原子与分子研究所孔庆昌研究员给予我很多指导和帮助，使我受益匪浅。固体微结构实验室朱永元教授、何京良教授、赵小宁高级工程师、秦亦强教授、王慧田教授、王振林教授、吕鹏、刘辉、张超、王前进、李涛等老师、上海光机所杭寅研究员、台湾中央研究院原子与分子研究所涂时雨助理、裴善壮助理和台湾大学彭隆汉教授都给了我无私的帮助，借此机会向他们表示衷心的感谢。在这里还要感谢化学系的宋焱焱同学在生活上给予我的照顾和工作上的支持。衷心感谢我的家人、他们对我无私的支持和爱是我前进的动力。在此特别感谢我的姐姐和姐夫，是你们完全承担起了照顾父母的责任，是你们的理解和支持使我能够安心学业！

本论文的完成与实验室全体人员的密切合作是分不开的，和他们一起工作的日子充满阳光，在此向课题组成员：章晨、董正高、王飞燕、王翔、赵刚、张勇、胡小鹏、徐平、俞友宾、喻小强、李家齐、齐臻、潘淑娣、王俊峰、王雯、周林、张艳婷、杨伟卿、严仲、王富明、谢臻达、袁晔、赵丽娜、等人表示衷心的感谢。

高志达

二零零七年五月