

激光与光电子学进展

光刻用准分子激光器光谱控制中温度分布
对输出光谱影响特性分析王倩^{1,2}, 赵江山^{1,2,3}, 郭馨^{1,2}, 范元媛^{1,2,3,4}, 周翊^{1,2,3*}, 江锐^{1,2,3}¹中国科学院微电子研究所, 北京 100094;²北京市准分子激光工程技术中心, 北京 100094;³中国科学院大学, 北京 100094;⁴应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 研究了激光传输过程线宽压窄模块内部热量累积对系统输出光谱的影响。通过理论分析及实验验证,分析了激光光束传输条件下,棱镜温度变化引起的材料折射率分布不均匀,以及不同惰性气体对输出激光光谱长时间稳定性的影响。结果表明,激光与线宽压窄模块内部元件相互作用,使光学元件温度升高,输出光谱展宽。惰性气体防护系统通过气体流动减小线宽压窄模块内部热量的积累,维持输出光谱的长时间稳定性。模块内部热量的累积对光谱纯度值影响较大,对半峰全宽影响不大。与 N₂ 相比,He 折射率随温度变化较小,可使输出激光光谱纯度值长时间保持稳定。

关键词 激光光学; 准分子激光器; 窄线宽; 热效应; 惰性气体

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914003

Analysis of Influence of Temperature Distribution in Spectral Control
of Excimer Lasers for Lithography on Output SpectraWang Qian^{1,2}, Zhao Jiangshan^{1,2,3}, Guo Xin^{1,2}, Fan Yuanyuan^{1,2,3,4}, Zhou Yi^{1,2,3*}, Jiang Rui^{1,2,3}¹Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;⁴The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To gain an in-depth understanding of the thermal effect of the excimer laser on the linewidth narrowing module (LNM), we investigated the influence of the internal heat accumulated in the module on the output spectrum of the system. Through theoretical analysis and experimental verification, we consider the uneven distribution of the refractive index caused by the temperature change of the prism and the influence of different inert gases on the long-term stability of the output laser spectrum. The results show that the laser interacts with the internal components in the LNM to increase the temperature of the optical components and broaden the output spectrum. The inert gas protection system reduces the accumulation of heat inside the LNM through gas flow and maintains the long-term stability of the output spectrum. The accumulation of heat inside the module has a great influence on the spectral

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-09-18; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家重大科技专项(2013ZX02202)、国家自然科学基金(61705235)、应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO-201915)

*E-mail: zhouyi@aoe.ac.cn

purity value, and has little influence on the full width at half maximum. Compared with N_2 , the refractive index of He has a smaller change with temperature, which can keep the spectral purity of the output laser spectrum stable for a long time.

Key words laser optics; excimer laser; narrow linewidth; thermal effects; inert gas

OCIS codes 140.2180; 300.3700; 120.6810

1 引言

光刻光源是光刻机最核心的部件之一,其性能对于集成电路制造水平具有重要的意义,是光刻技术发展的重要支撑。作为目前光刻光源的主流选择^[1-2],光刻准分子光源被要求具有高重复频率、大能量、窄线宽、高稳定性的激光输出,系统结构复杂,实现难度大,技术门槛极高。准分子激光光源工作介质一般为稀有气体及卤素气体,并充入惰性气体作为缓冲剂,工作气体受到放电激励,发生激发、离化、复合等反应,在激发态形成短暂存在的“准分子”。准分子受激辐射跃迁,形成紫外激光输出。常规条件下准分子自由运转激光光谱宽度可以高达几百 pm^[3],这样的光谱宽度无法满足光刻应用对窄线宽的要求(激光线宽 ≤ 0.35 pm@FWHM 或 ≤ 1 pm@E95)。因此,需要对光谱进行线宽窄化控制。典型的线宽压窄模块为棱镜扩束器与光栅的组合结构^[4]。模块由棱镜扩束组和色散光栅构成,利用棱镜扩束组实现光束在空间上的展开,再利用光栅的色散特性实现线宽窄化控制,形成具有特定中心波长的激光输出^[5-6]。光刻用准分子激光器光谱输出的测量指标常通过半峰全宽(FWHM)和光谱纯度(E95)来表示。FWHM为光强下降到峰值光强一半处的谱线宽度,E95为包含95%能量区域的谱线宽度。

国内外研究者对准分子激光器线宽压窄模块的应用进行了广泛的研究,明确了系统输出光谱的主要影响因素为激光光束发散角、棱镜组扩束倍率、激光波长、光栅衍射角以及放电腔腔长等指标^[7-9]。从激光放电腔出射的光束具有一定的发散角,发散角使光束入射光栅的角度在中心值附近有一个较小的范围(~ 1 mrad),因此,谐振输出的激光也在中心波长附近形成一个较小的范围,这个范围即为光谱宽度。对于一个确定的放电腔以及线宽压窄系统,激光波前会因系统热效应发生改变,导致激光在传输过程中发散角增大,光谱展宽。热效应的影响既包括放电腔热效应,也包括激光光束在线宽压窄模块光学元件传

输过程中由温度变化引发的热效应。本文主要讨论线宽压窄系统内部光学元件热效应引发的发散角增大问题,并通过优化惰性气体防护系统减轻热效应的影响。

2 理论分析

2.1 激光光束对棱镜的加热作用

光刻用准分子激光系统线宽压窄模块中棱镜的材质为氟化钙(CaF_2),具体物理性质如表1所示。

表1 CaF_2 的物理性质^[10]
Table 1 Physical properties of CaF_2 ^[10]

Parameter	Value
Density / ($g \cdot cm^{-3}$)	3.18
Refractive index	1.4687@248 nm
$\frac{\Delta n}{\Delta T} / ^\circ C^{-1}$	-10.6×10^{-6} (20–40 °C)
Thermal conductivity / ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	9.7
Specific heat capacity / ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.893
Thermal diffusivity / ($cm^2 \cdot s^{-1}$)	35.6
Melting point / °C	1360
Expansion coefficient / $^\circ C^{-1}$	2.08×10^{-5}

设准分子放电腔单腔输出光斑形状为矩形,尺寸为 $2\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,激光中心波长为 248.3 nm ,入射到线宽压窄模块的最高能量密度为 1.4 J/cm^2 ,激光器工作的重复频率为 4 kHz 。

光束在线宽压窄模块中的传播情况如图1所示

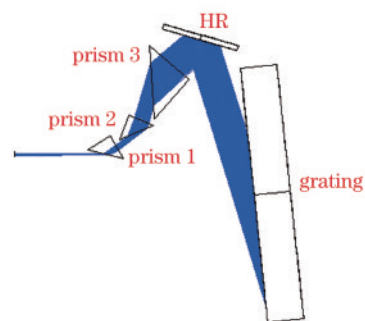


图1 光束在线宽压窄模块内部的传播路径

Fig. 1 Beam propagation path in LNM

示。光束以 75.5° 的入射角入射到棱镜表面,经棱镜扩束后,光束入射到光栅表面,经光栅衍射分光后光束按原路返回。返回光束进入放电腔,经增益振荡后,激光通过耦合输出镜输出。

设定环境温度为 20 °C,棱镜材料对激光的吸收系数为 0.002 cm⁻¹[10],光学元件对激光能量的吸收遵循比尔定律,即

$$\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha I, \quad (1)$$

式中:α为 CaF₂对深紫外激光的吸收系数;I为入射光强; z为光程长度。棱镜吸收的光强作为棱镜体

内部加热源,通过求解材料内部温度场控制方程,即可得到棱镜内部的温度分布情况。材料内部温度场控制方程可表示为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q = \alpha I, \quad (2)$$

式中:ρ为材料密度;C_p为材料恒压热容;k为材料导热系数;T为温度值;t为时间;Q为棱镜吸收的热量。

当棱镜处于空气中,使用外部自然对流边界条件(外部气压为 101.325 kPa,棱镜的高度为 25 mm)仿真分析激光脉冲与棱镜相互作用,得到棱镜温度随时间的变化情况,如图 2 所示。

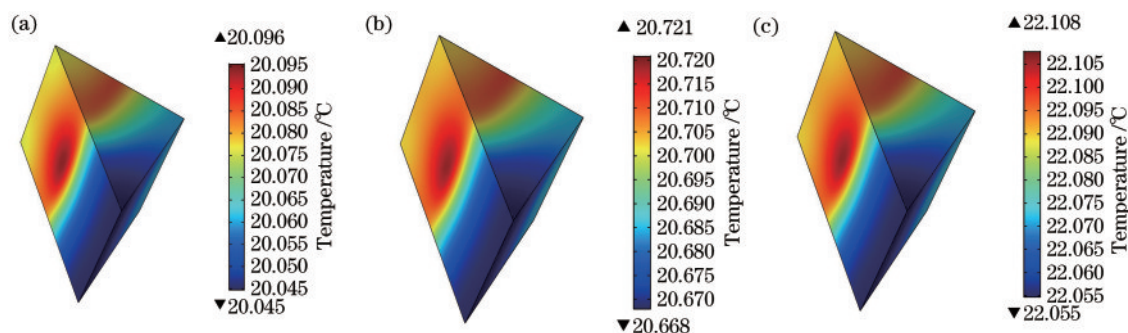


图 2 激光与棱镜作用时,不同时刻棱镜的温度分布。(a) 1 min;(b) 10 min;(c) 30 min

Fig. 2 Temperature distribution of the prism at different moments when the laser interacts with the prism. (a) 1 min; (b) 10 min; (c) 30 min

从图 2 可以看出,经过光束与棱镜的相互作用,激光脉冲辐射区域温度升高。温度较高区域集中在光斑位置,随着时间的推移,高温区域逐步扩散,激光与棱镜作用 30 min 后,棱镜温度从初始的 20 °C 升高至 22.1 °C,且棱镜尖端位置的温度较高。温度升高导致折射率减小,元件折射率分布变得不均匀。图 3 所示为棱镜入射面的几何中心点折射率随时间的变化情况。图 4 所示为棱镜折射率分布情况,其中图 4(a)~(c)为折射率

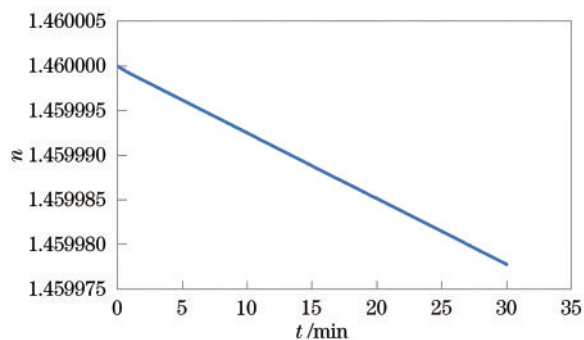


图 3 激光与棱镜作用时,棱镜入射面几何中心点的折射率随时间的变化情况

Fig. 3 Refractive index of the prism center point changed with time when the laser interacts with the prism

显示标尺不变时,光束与棱镜作用 1, 10, 30 min 时棱镜折射率的变化情况;图 4(d)为折射率显示标尺细化,且光束与棱镜作用 30 min 后,棱镜折射率的分布情况。

假设入射棱镜的激光光束为平面波,发散角为 0°,波前为平面。在理想情况下,通过棱镜后,出射光束依然为平面波,波前为平面。但激光对棱镜具有加热作用,导致棱镜折射率发生变化,光束在棱镜中的传播速度及方向发生变化,使得出射光束波前由平面变为曲面,激光光束由平面波变为球面波,光束发散角变大,激光光谱展宽。根据 CaF₂ 折射率随温度的变化情况以及线宽压窄模块内的光程长度,当光学元件局部温度相差 1 °C 时,引起的波前畸变为 5.3 μm。根据经验,当波前畸变超过 λ/5 (λ=632.8 nm) 时,系统输出光谱开始展宽,此波前畸变对应的温度差为 0.03 °C。因此,需要采取相应的散热措施,使光束通过的光学元件区域温度差控制在 0.03 °C 以内。

2.2 惰性气体防护系统的散热作用

从放电腔出射的光束宽度为 1.5 mm,经过棱镜组的光束宽度较小,因此,棱镜热效应对波前畸

变的影响较小。中阶梯光栅由于其闪耀角较大，投影到光栅表面的光束宽度大，光栅表面温度差对光束波前畸变的影响较大，因此需要重点关注光栅表面的温度分布情况。激光器在 4 kHz 工作

频率的运转情况下，光栅表面吸收热量，温度升高，但温度上升并不均匀。在光斑中心的位置，光束能量较高，因此光栅中间部分温度高，两端处略低。

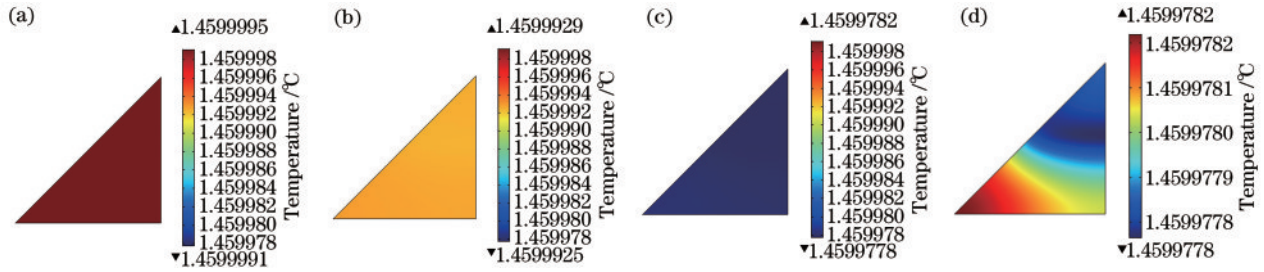


图 4 激光与棱镜作用时，线宽压窄模块中棱镜折射率分布情况。(a) 1 min; (b) 10 min; (c) 30 min; (d) 标尺细化，且作用 30 min 后的折射率分布

Fig. 4 Distribution of refractive index of the prism when the laser interacts with the prism in the linewidth narrowing module. (a) 1 min; (b) 10 min; (c) 30 min; (d) distribution of refractive index after the laser interacts with LNM for 30 min when the display scale is refined

在空气自然对流的条件下对线宽压窄模块中光束与光学元件的作用情况进行仿真分析，光束与光学元件作用 30 min 后，温度分布情况如图 5 所示。第 1 个棱镜温度最高，随着光束能量的损失及光斑面积的扩大，第 2、第 3 个棱镜的温度略有下降。由于光栅闪耀角大，光束在光栅表面的作用面积大，光束对光栅整体加热作用不明显。观察光栅表面的温度分布情况(图 6)可知，光栅中心的最高温度为 21.14 °C，两端温度为 21.10 °C，中心与两端的温度差为 0.04 °C，这种局部温度差引起的波前畸变使得输出光谱展宽。同时，由于光学元件的衍射作用以及表面的加工误差等，波前畸变加剧，光谱的展宽现象进一步加剧。

需要选取合适的惰性气体对光栅表面进行吹

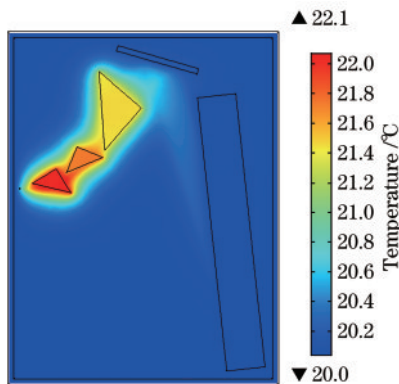


图 5 线宽压窄模块内部温度分布情况
Fig. 5 Internal temperature distribution of linewidth narrowing module

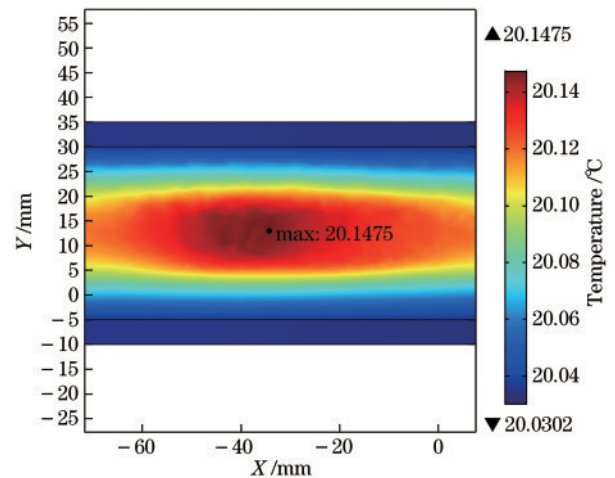


图 6 光栅表面温度分布情况

Fig. 6 Grating surface temperature distribution

扫，以减小光栅表面的温度差，避免波前畸变进一步恶化，提升系统输出光谱质量。另外，光刻中使用的准分子激光为深紫外激光，为了减小深紫外激光在空气中的损耗，也需要使用惰性气体对线宽压窄模块内部进行吹扫，因此，要求惰性气体应具有较好的热传递性能，折射率随温度变化较小。

He 和 N₂ 均为常用的吹扫气体，其物理性质如表 2 所示。He 的折射率随温度变化率为 -0.09×10^{-6} ，导热系数约为 0.16 W/(m·K)；N₂ 的折射率随温度变化率为 -0.90×10^{-6} ，导热系数约为 0.054 W/(m·K)，He 的折射率随温度变化率是 N₂ 的 1/10，导热系数约为 N₂ 的 3 倍，理论上 He 会对模块有更好的散热效果。分别使用 He、N₂ 作为线宽压

表 2 He、N₂的物理性质

Table 2 Physical properties of He and N₂

Gas type	Refractive index	$\frac{dn}{dT}$	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
He	1.000035	-0.09×10^{-6}	0.16@43 °C
N ₂	1.000315	-0.90×10^{-6}	0.054@43 °C

窄模块的吹扫气体,验证线宽压窄模块热效应对输出光谱的影响。吹扫装置如图 7 所示。气体通过光栅表面下方一系列直径约 1 mm 的小孔自下而上进行吹扫,小孔间隔 17 mm,吹扫速率约 1 L/min。光栅前加装挡板和盖板:一方面可以最大限度地保护光栅,防止灰尘积累;另一方面挡板和盖板迫使大部分氦气沿图 7(b)箭头所示的方向流动。

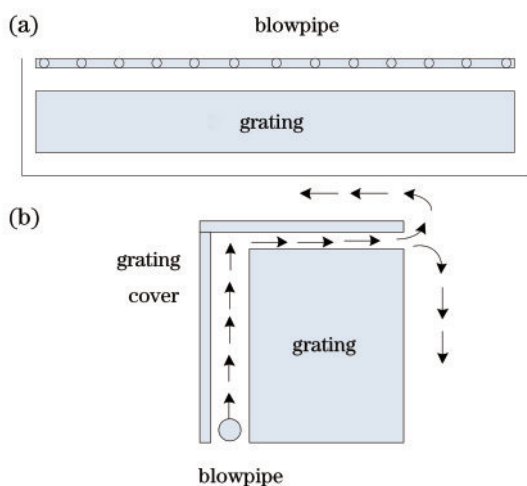


图 7 气体吹扫装置示意图。(a)俯视图;(b)侧视图
Fig. 7 Schematic of gas purging device. (a) Top view; (b) side view

在仿真计算中分别使用 He 和 N₂对线宽压窄模块进行散热,设定 He 和 N₂流速均为 1 L/min,30 min 后温度分布情况如图 8 所示。与没有气体吹扫的情况相比,He 吹扫时模块温度下降约 1 °C 后形成稳定的温度场分布;N₂吹扫时模块温度下降约 0.3 °C 后形成稳定的温度场分布。

光栅表面的温度分布情况如图 9 所示。使用 He 吹扫时,棱镜表面局部温度差为 0.007 °C;使用 N₂吹扫时,棱镜表面局部温度差为 0.024 °C;与无气体吹扫的情况相比,使用 He 和 N₂吹扫时温度差明显减小,这表明惰性气体防护系统能够对光栅表面进行散热,形成稳定均匀的温度场分布,避免波前畸变恶化,提升系统输出光谱质量,且 He 比 N₂具有更好的散热效果。

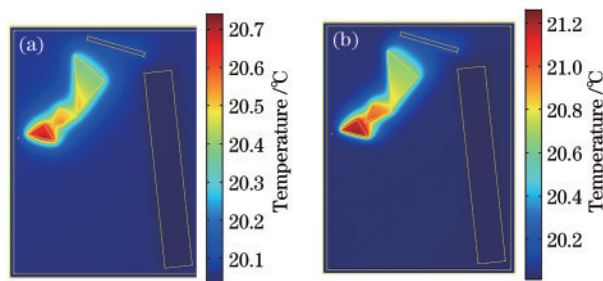


图 8 使用 He 和 N₂吹扫时,线宽压窄模块温度分布情况。
(a)He;(b)N₂

Fig. 8 When using He and N₂ purging, the temperature distribution in the linewidth narrowing module. (a) He; (b) N₂

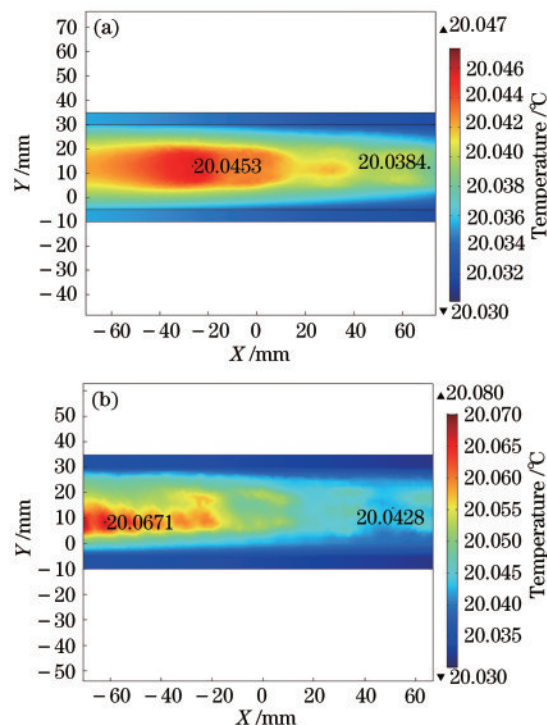


图 9 使用 He 和 N₂吹扫时,光栅表面温度分布情况。
(a) He;(b) N₂

Fig. 9 Temperature distribution of the grating surface when using He and N₂ purging. (a) He; (b) N₂

图 10 所示为分别使用 N₂和 He 吹扫 30 min 时的光谱输出结果。从实验结果可以看出:使用 N₂吹扫时,由于热量的累积,输出激光光谱的 E95 值不断增大,FWHM 较为稳定;使用 He 吹扫时,由于 He 折射率对温度不敏感且具有较好的热传递特性,输出激光光谱的 E95 值和 FWHM 均保持在较为稳定的状态。从实验结果也可得出,热效应导致的波前畸变主要影响激光光谱的 E95 值。图 11 所示为使用 N₂和 He 吹扫时的瞬时光谱形状。

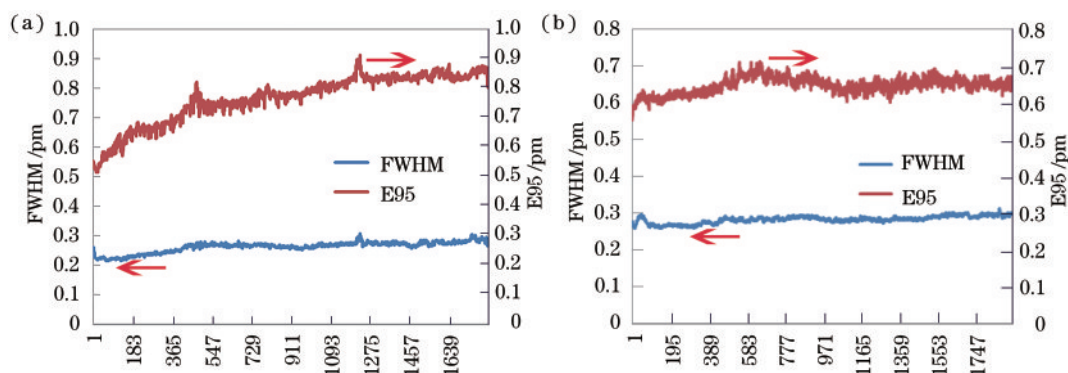


图 10 使用不同惰性气体吹扫时的光谱输出结果(30 min)。(a)He;(b)N₂

Fig. 10 Spectral output results when using different inert gases for purging (30 min). (a) He; (b) N₂

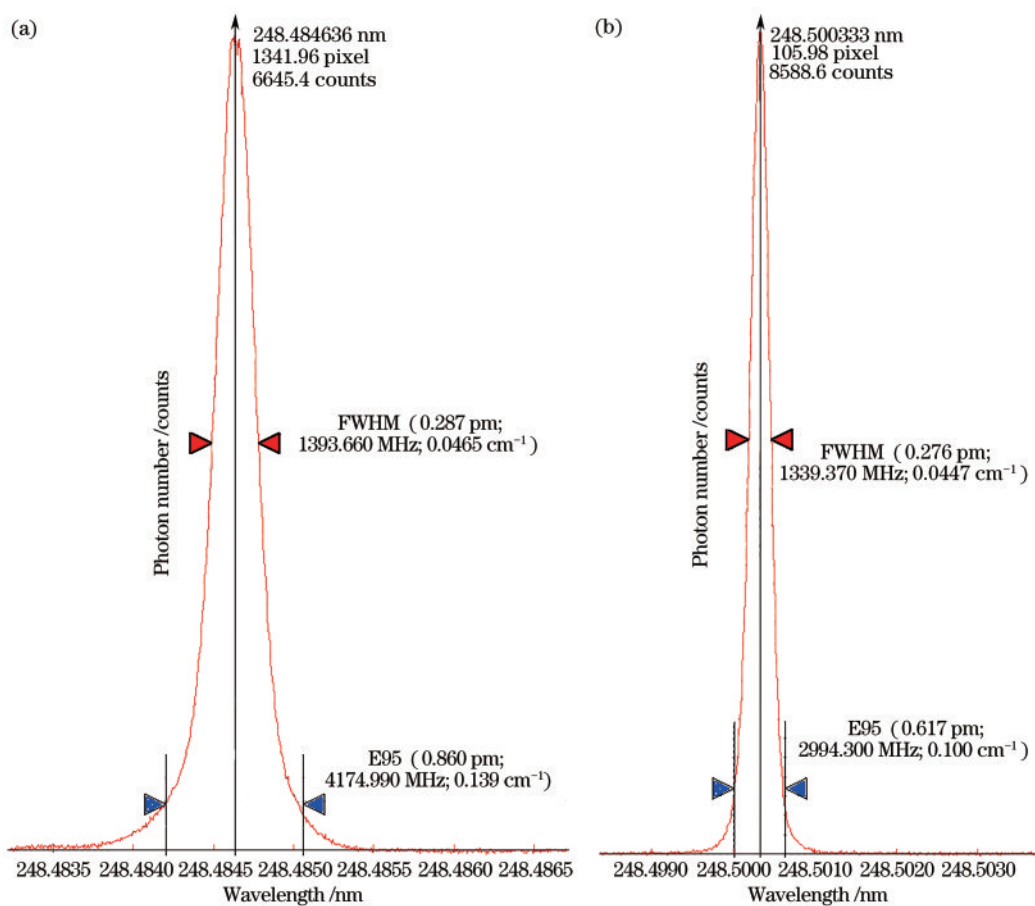


图 11 使用不同惰性气体吹扫时瞬时光谱输出结果。(a)He;(b)N₂

Fig. 11 Instantaneous spectral output results when using different inert gases for purging. (a) He; (b) N₂

3 结 论

对准分子激光器线宽压窄模块中热效应的影响进行了理论分析和实验验证,分析了热效应对光谱的影响机理,实验验证了惰性气体防护系统对模块热效应的抑制作用。从以上分析及实验结果可以看出,激光与线宽压窄模块内部元件相互作用,使光学元件温度升高,输出光谱展宽。惰性

气体防护系统可以通过气体流动减小线宽压窄模块内部热量的积累,维持输出光谱的长时间稳定性。模块内部热量的累积对E95值影响较大,对FWHM值影响不大。与N₂相比,He折射率随温度变化较小,可使输出激光光谱E95值长时间保持稳定。

通过上述针对“热效应”的分析讨论,可以进一步优化、改进线宽压窄模块热效应控制方法,对于

光刻准分子激光器线宽压窄模块的工程化应用具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Stamm U, Kleinschmidt J, Heist P, et al. ArF excimer laser for 193-nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3334: 1010-1013.
- [2] Miyamoto H, Furusato H, Ishida K, et al. Next-generation ArF laser technologies for multiple-patterning immersion lithography supporting leading edge processes [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1058: 1058710.
- [3] Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] Zhang H B, Lou Q H, Zhou J, et al. ArF excimer laser line narrowing technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 46-51.
张海波, 楼祺洪, 周军, 等. ArF 准分子激光器线宽压缩技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 46-51.
- [5] Barr J R M. Achromatic prism beam expanders[J]. Optics Communications, 1984, 51(1): 41-46.
- [6] Loewen E, Maystre D, Popov E, et al. Diffraction efficiency of echelles working in extremely high orders [J]. Applied Optics, 1996, 35(10): 1700-1704.
- [7] Zhang H B, Yuan Z J, Zhou J, et al. Optimal design of prism beam expander in line narrowed excimer laser cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102008.
张海波, 袁志军, 周军, 等. 窄线宽准分子激光腔内棱镜扩束器的优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102008.
- [8] Shan Y Y, Zhao J S, Li H, et al. Application study on fused silica prisms in excimer laser spectrum control [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402008.
单耀莹, 赵江山, 李慧, 等. 熔融石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402008.
- [9] Wang Q, Zhao J S, Zhou Y. Analysis on precision assembly characteristics of prism expander applied to spectrum control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401012.
王倩, 赵江山, 周翊. 用于光谱控制的棱镜扩束装置精密装调特性分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401012.
- [10] Calcium fluoride (NICF series) [EB/OL]. [2020-08-25]. <https://www.nikon.com/products/components/lineup/materials/caf2/>.