声光调 Q CO_2 激光器的实验研究

何 洋[1],陆 君[2],陈 飞[1],李殿军[1],郑长彬[1],谢冀江[1],郭 劲[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,
吉林 长春 130033; 2. 第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘 要: 为满足 13.5 nm 极紫外光刻(EUVL)等领域的应用需求,研制了高重复频率、高稳定性的声光调 Q CO_2 激光器。首先,对声光 Q 开关的工作原理进行了分析,并实验研究了调制信号电压与衍射效率的关系。接着, 研究了调制信号占空比对脉冲波形的影响, 通过选择适当的占空比消去了脉冲拖尾。然后,对不同重复频率下的脉冲宽度、功率和脉冲幅值稳定性进行了测量和分析。最后,对激光器的光束指向稳定性进行了测量。实验结果表明:该激光器实现了重复频率 1~100 kHz 连续可调的脉冲输出,在重复频率 1 kHz 时,获得最小脉冲宽度 252 ns 和最大峰值功率 7 579 W 的激光脉冲输出。通过设计以殷钢管为主体的支撑架,使得激光器的脉冲幅值不稳定性小于 3%,光束指向稳定性为 46.6 μrad。该声光调 Q CO_2 激光器可作为高性能种子源在 EUVL 等领域中得到应用。

关键词: CO_2 激光器; 声光调 Q; 重复频率; 稳定性

中图分类号: TN248.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1007-2276(2015)08-2280-06

Experimental researches on acousto-optic Q-switched CO_2 laser

He Yang[1], Lu Jun[2], Chen Fei[1], Li Dianjun[1], Zheng Changbin[1], Xie Jijiang[1], Guo Jin[1]

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to meet the demand of 13.5-nm extreme ultraviolet lithography (EUVL), an acousto-optically Q-switched CO_2 laser was developed, which has high repetition rate and high stability. First, the operating principle of the acousto-optic Q-switch was analyzed and the relationship between the voltage of modulated signal and diffraction efficiency was researched experimentally. And then, by studying the influence of modulated signal duty cycle on pulse waveform, the appropriate duty cycle was chosen to eliminate the pulse tail. Under the conditions of different repetition rates, pulse duration, power and the pulse amplitude stability were measured and analyzed. Finally, the beam pointing stability of the laser was measured. Experimental results indicate that the range of pulse repetition rate can be adjusted from 1 kHz to 100 kHz. When the repetition rate is 1 kHz, the minimum pulse duration is 252 ns and the maximum peak power reaches 7 579 W. By designing the support frames mainly made of invar steel, the unstablity of pulse amplitude is less than 3% and the beam pointing stability is only 46.6 μrad. This

收稿日期:2014-12-05; **修订日期**:2015-01-03

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新项目(Y25632C120);
激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究课题(SKLLIM1413)

作者简介:何洋(1988-),男,研究实习员,硕士,主要从事高功率气体激光器和固体激光器方面的研究。Email:heyang_3g@126.com

acousto-optic Q-switched CO_2 laser is suitable for a seed source used in EUVL.

Key words: CO_2 laser;　acousto-optic Q-switch;　repetition rate;　stablity

0 引　言

在未来的半导体工业中，13.5 nm 极紫外光刻(EUVL)将作为下一代光刻技术，用于生产小于 22 nm 工艺的半导体芯片[1]。其主要的技术途径之一就是使用高功率的脉冲 CO_2 激光与 Sn 液滴靶相互作用，产生等离子体辐射 13.5 nm EUV 光[2]。CO_2 激光与 Sn 靶作用时，激光需聚焦至几十 μm，功率密度高达 10^9~10^{10} W/cm^2，重复频率需在数 kHz 至百 kHz 之间连续可调，以便与液滴靶同步，这对 CO_2 激光驱动系统具有相当苛刻的综合指标要求。其中，高功率的脉冲 CO_2 激光驱动系统通常采用主振荡功率放大(MOPA)结构来构建，即使用小型脉冲 CO_2 激光器作为种子源输出高重复频率、高稳定性的种子光，然后再利用 CO_2 功率放大器对种子光进行功率放大以实现高功率的脉冲 CO_2 激光输出[3]。种子源的输出特性对整个系统的性能至关重要，因此研究高性能的小型脉冲 CO_2 种子源是研制 EUVL 的重要课题之一。此外，高性能小型脉冲 CO_2 激光器在光谱学、成像雷达、激光加工及激光测距等领域也具有广阔的应用前景[4-7]。

小型 CO_2 激光器实现脉冲输出的方法主要有机械调 Q 法、电光调 Q 法和声光调 Q 法。

机械调 Q 法主要采用转镜技术和机械斩波技术实现脉冲输出，脉冲峰值功率可达数百 kW，且具有结构简单、稳定可靠、成本低等优点，但受转镜和斩波器转速的限制而难以实现高重复频率脉冲输出[8]。

电光调 Q 法通常采用 CdTe 晶体作为 CO_2 激光器的开关器件，可实现重复频率 100 kHz、脉冲宽度几十 ns 的脉冲输出，但由于 CdTe 单晶生长困难，机械性能较差，所需调制电压一般高达 2~4 kV，且高重复频率下的高压脉冲电源制作困难，这使得电光调 Q 法的技术复杂，成本较高[9]。

声光调 Q 法是在谐振腔内放置声光 Q 开关，利用声光作用控制光腔损耗以实现调 Q 脉冲输出[4]。该方法能够实现 CO_2 激光器的高重频和窄脉宽输出，且技术相对简单，成本较低[10]。文中将对基于声光调 Q 法的封离式 CO_2 激光器进行介绍，该激光器可实现重复频率为 1~100 kHz 连续可调的脉冲输出，且脉冲波形无拖尾。为了减少热和振动的影响，将激光器整体搭建在以殷钢管为主体的支撑架上，得到了较好的输出稳定性，其中脉冲幅值稳定性小于 3%，光束指向稳定性为 46.6 μrad。这为将声光调 Q CO_2 激光器作为种子源应用于 EUVL 等领域提供了可能。

1 实验装置

1.1 声光 Q 开关

声光 Q 开关(AOM)是声光调 Q CO_2 激光器的关键部件，其工作原理如图 1 所示，当超声波在介质中传播时会引起声光晶体折射率的周期性变化，形成相位光栅，当光波通过介质时会产生衍射实现光束偏转。超声波一般是由几十 MHz 的射频信号通过声光换能器产生的，声光 Q 开关的驱动器能够产生射频信号，该驱动器可利用信号发生器产生的方波调制信号控制射频信号的输出，从而决定光束是否处于偏转状态。实验中所采用的调 Q 装置为英国 Gooch&Housego 公司的 CO_2 声光 Q 开关和射频驱动器。声光晶体由多晶锗制成，对于 9.4~10.6 μm 波长的光束，其透过率大于 95%。射频驱动器可产生最高功率 125 W、频率 40 MHz 的射频信号。

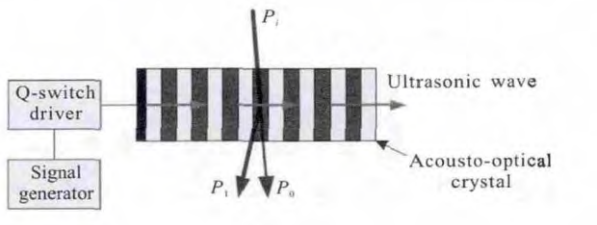


图 1 声光 Q 开关工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of acousto-optic Q-switch

1.2 激光器

实验装置如图 2 所示，整个封离式 CO_2 激光器架设在以殷钢管为主体的支撑架上，由于殷钢管具

有较小的热膨胀系数，约为 2.0×10^{-6}/℃[11]，因此当环境温度变化时，殷钢管的长度能保持相对稳定，CO_2 激光器的腔长不会发生明显变化，同时，某些实验装置，如水冷机、散热风扇等产生的振动会对激光器造成影响，殷钢管能够起到隔振的作用，减小振动对 CO_2 激光器性能的影响。因此殷钢管能够有效保证 CO_2 激光器具有较好的脉冲幅值稳定性和光束指向稳定性。

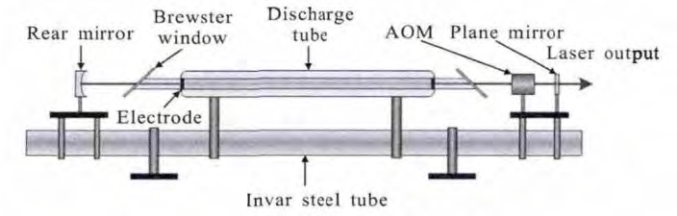


图 2 声光调 Q CO_2 激光器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of acousto-optic Q-switched CO_2 laser

谐振腔采用平凹腔结构。其中，全反镜为镀金膜的铜镜，反射率为 98.5%，曲率半径为 5 m。输出镜为锗镜，透过率为 23%。谐振腔的物理长度为 2.2 m。放电管由带水冷套的玻璃管制成，管内径为 10 mm，电极之间为增益区，增益区长度为 0.8 m，气压为 3.3 kPa，Xe，CO_2，N_2，He 气体的体积比为 1:2.5:2.5:17.5。放电管两端为 ZnSe 制成的布儒斯特窗。在放电管和输出镜之间为声光 Q 开关，使用方波调制信号控制声光 Q 开关状态：在方波信号处于高电平时，驱动器输出射频信号，声光晶体中产生超声波使光束偏离腔外，谐振腔处于高损耗低 Q 值状态；当方波信号变为低电平状态时，驱动器停止输出射频信号，谐振腔处于低损耗高 Q 值状态，形成激光振荡，引发脉冲输出。

2 实验结果与分析

2.1 衍射效率

衍射效率是表征声光 Q 开关性能的主要参数，它体现了声光晶体偏转光束的能力，足够高的衍射效率可以保证激光器具有较好的输出性能[12]。衍射效率与射频信号功率有关，而射频信号的功率由信号发生器输出的方波调制信号电压决定。

为了选择适合的信号电压使声光 Q 开关具有较高的衍射效率，实验中对方波调制信号电压 Us 和衍射效率 η 之间的关系进行了测量。测量方法如图 3 所示，将信号发生器输出方波信号的占空比设置为 100%，输入相应的电压值，启动声光 Q 开关和 CO_2 激光器，利用功率计分别对衍射光功率 P_1 和入射光功率 P_i 进行测量，P_1/P_i 就是衍射效率 η。其中，分光镜将 CO_2 激光器输出功率的 10%反射至功率计，光阑可阻挡未偏转的透射光进入功率计。

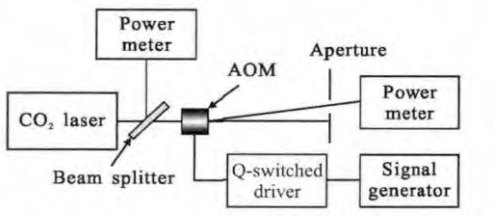


图 3 衍射效率测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of diffraction efficiency calibration

测量结果如表 1 所示，可见，在 U_s 较低时，η 随 U_s 的增长而显著增加，当 $U_s\geqslant2.2$ V 时，η 增长缓慢，趋于饱和，保持在 90%以上，但当 $U_s>3$ V 时，施加到声光 Q 开关上的射频功率较强，导致晶体温度上升过快，不利于散热。因此，在 2.2~3 V 之间选择信号输入电压可以保证声光 Q 开关具有较高的衍射效率，同时也不会带来较强的热效应。

表 1 衍射效率测量结果

Tab.1 Results of diffraction efficiency calibration

No.	U_s/V	P_i/W	P_1/W	η
1	1.2	3.82	2.23	58.4%
2	1.4	3.80	2.47	65.0%
3	1.6	3.84	2.78	72.4%
4	1.8	3.85	3.06	79.5%
5	2.0	3.82	3.29	86.1%
6	2.2	3.80	3.49	91.8%
7	2.4	3.82	3.53	92.4%
8	2.6	3.82	3.54	92.7%
9	2.8	3.83	3.53	92.2%
10	3.0	3.81	3.54	92.9%

2.2 脉冲波形

对声光调 Q CO_2 激光器进行了实验研究，实验结果表明，激光器放电电流为 12 mA 时，在不加入声光 Q 开关的情况下，连续输出功率可达~22 W，加入声光 Q 开关后，在 U_s 设定为 2.4 V 时，可实现最大输出功率 7.33 W 的脉冲输出。该 CO_2 激光器重复频

率的调谐范围为 1~100 kHz。

如图 4 所示为重复频率 50 kHz 情况下，使用荷兰 ZIGO 公司的 PVM-10.6 型 HgCdTe 探测器和美国 Tektronix 公司的 TDS3052B 型示波器测得的输出激光脉冲波形图。由图 4(a)可见，当方波信号为 80% 占空比时，脉冲宽度为 497.6 ns，且脉冲波形存在较长的拖尾，拖尾会占据部分脉冲能量，增加脉冲宽度，影响脉冲间隙内的储能，造成峰值功率降低，此时的平均输出功率为 7.21 W。当将方波信号的占空比增加到 90%时，激光平均输出功率会略有降低，达到 6.36 W，但是激光输出脉冲波形得到了明显改善，由图 4(b)可见，脉冲波形接近于高斯型，脉冲宽度减小为 414.1 ns，脉冲拖尾消失。但若继续将方波的占空比增加至 95%，则脉冲波形消失，激光输出功率降为 0。

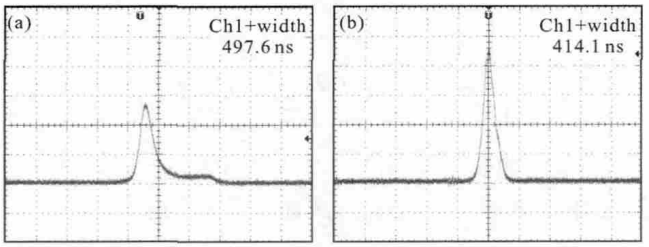


图 4 占空比为 80%和 90%时的激光单脉冲波形

Fig.4 Diagrams of pulse waveforms when duty ratio are 80% and 90% respectively

这是由于占空比的增加使每个周期内 Q 开关的开启时间减小，当 Q 开关开启时，激光在谐振腔内振荡形成脉冲输出，但是当脉冲后沿及拖尾还未形成时，Q 开关关闭，这使得脉冲后沿和拖尾被“削掉”，因此输出脉冲的脉冲宽度减小，拖尾消失。但若 Q 开关开启时间过小，则在脉冲还未振荡输出时，Q 开关关闭，使得脉冲消失。因此，通过适当地增加方波信号占空比可以实现压缩脉冲宽度，消去脉冲拖尾，改善输出激光脉冲波形。

2.3 脉冲输出特性

实验中重点对不同重复频率情况下的脉冲宽度、功率和脉冲幅值稳定性等进行了测量和分析。

如图 5(a)~(b)分别为经过脉冲波形优化后，在重复频率为 1 kHz、10 kHz、30 kHz 和 100 kHz 情况下，输出激光的单脉冲波形图。由图 4(b)和图 5 可见，随着重复频率的增长，脉冲宽度随之增加。当重复频率为1 kHz 时，获得最小脉冲宽度 252.0 ns。

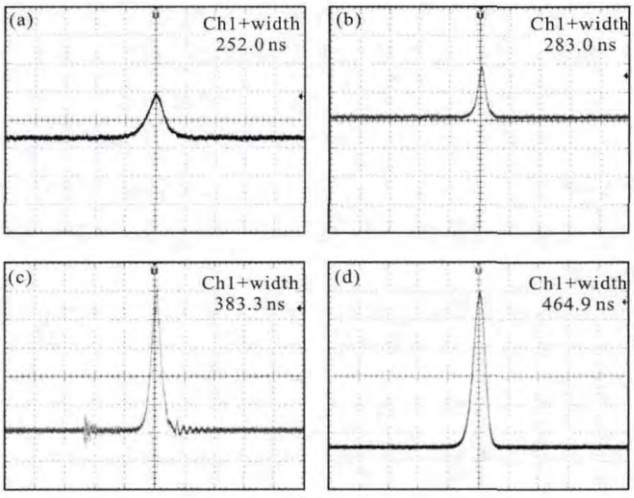


图 5 重复频率为 1 kHz、10 kHz、30 kHz 和 100 kHz 时的激光单脉冲波形

Fig.5 Diagrams of pulse waveforms when repetition rates are 1 kHz, 10 kHz, 30 kHz and 100 kHz respectively

输出脉冲的平均功率和峰值功率随重复频率的变化关系如图 6 所示。可见，平均功率随重复频率的增加而上升，在 100 kHz 处达到最大值 7.33 W，峰值功率随着重复频率的增加而下降，在 1 kHz 处，虽然平均功率仅为 1.91 W，但峰值功率达到最大值 7579 W。

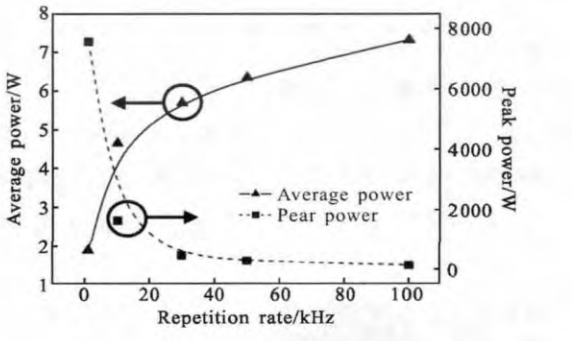


图 6 平均功率和峰值功率随重复频率变化曲线

Fig.6 Average power and peak power versus repetition rate

如图 7 (a)~(b) 分别为重复频率分别为 1 kHz、10 kHz、50 kHz 和 100 kHz 情况下，激光器的脉冲输出波形图，可见，脉冲幅值稳定性较好，不稳定度分别为 0.53%，0.9%，1.14%和 2.84%，随着重复频率的增加，脉冲幅值稳定性会随之略微变差，但脉冲幅值不稳定性总体保持在 3%以下。

测量结果表明，在重复频率为 1 kHz 情况下，激光器的脉冲宽度、峰值功率和脉冲幅值稳定性均达到最佳状态。这是因为 CO_2 激光器上能级辐射寿命

为~1 ms，与脉冲间隔时间相近，在这种情况下，CO_2 激光器上能级能够在积累足够多粒子数的同时，减少自发辐射损耗，这使得激光器能够获得最大的反转粒子数利用率，激光增益达到最佳，同时，重复频率较低时，声光 Q 开关和驱动器运行相对稳定，因此易于实现窄脉宽、高峰值功率和高脉冲幅值稳定性的脉冲输出。

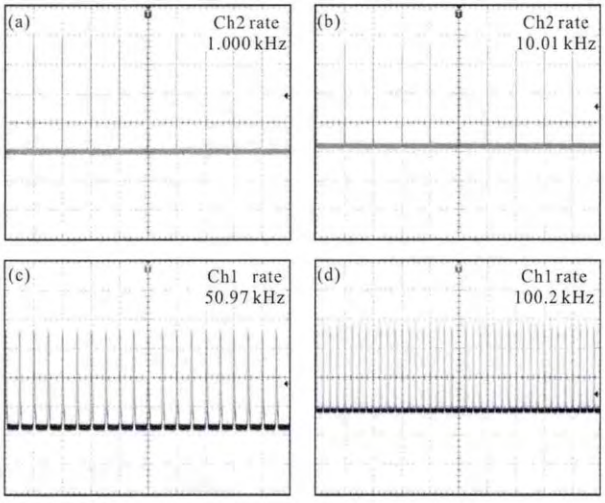


图 7 重复频率为 1 kHz、10 kHz、50 kHz 和 100 kHz 时的激光脉冲波形

Fig.7 Diagrams of output waveforms when repetition rates are 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz and 100 kHz respectively

2.4 光斑与光束指向稳定性

如图 8 所示为使用以色列 OPHIR 公司的 PY-III 型光束质量分析仪拍摄的 CO_2 激光光斑图像。可见，光斑在 x 方向与 y 方向的能量分布接近于高斯型，光斑形状较好。

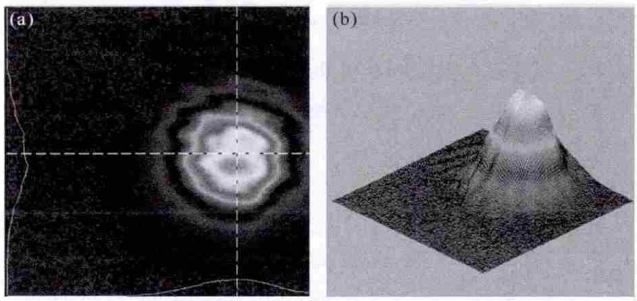


图 8 2 维和 3 维激光光斑图像

Fig.8 2D and 3D images of the output beam

在测量光斑的基础上，又对光束指向稳定性进行了研究。光束指向稳定性是指光斑能量分布质心的抖动和漂移程度，在 EUVL 和精密加工等领域中，光束指向稳定性是表征激光器性能的重要指标。它主要受温度和振动的影响，而殷钢管的使用减小了温度和振动对激光器的干扰，有助于保证 CO_2 激光器具有较好的光束指向稳定性。

实验中对声光调 Q CO_2 激光器的光束指向稳定性进行了测量，测量工具包括分光镜、ZnSe 聚焦透镜和光束质量分析仪。其中，CO_2 激光经分光镜后衰减至原有功率的 10%，ZnSe 聚焦透镜将衰减后的 CO_2 激光聚焦，在焦平面处放置光束质量分析仪对光斑进行观测，每隔 3 min 记录 1 次光斑能量分布质心在 x 方向和 y 方向上的坐标，共记录 10 组，分别求出坐标平均值 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$，然后计算出光束偏移量的均方根值 Z_{rms}，其计算公式为：

$$\bar{Z}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i-\bar{x})^2+(y_i-\bar{y})^2} \tag{1}$$

$$Z_{rms}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{(x_i-\bar{x})^2+(y_i-\bar{y})^2}-\bar{Z}\right)^2}{n}} \tag{2}$$

式中：n 为测量坐标次数，此次测量中 n=10。然后计算光束指向稳定性 $\Delta\theta_{rms}$，其计算公式为：

$$\Delta\theta_{rms}=\frac{Z_{rms}}{f} \tag{3}$$

式中：f=1 m，为 ZnSe 透镜焦距。测量结果如表 2 所示。由公式(1)~(3)计算可知，该激光器的光束指向稳定性较好，为 46.6 μrad。

表 2 光束指向稳定性测量结果

Tab.2 Result of beam pointing stability calibration

n	x_i/mm	y_i/mm	Z_{rms}/mm	$\Delta\theta_{rms}$/μrad
1	8.289 2	6.591 2		
2	8.309 0	6.603 2		
3	8.217 0	6.628 3		
4	8.116 4	6.607 7		
5	8.195 8	6.594 7		
6	8.221 9	6.609 6	0.046 6	46.6
7	8.273 9	6.609 6		
8	8.276 9	6.632 6		
9	8.248 1	6.614 0		
10	8.271 1	6.577 1		
Mean	8.241 9	6.606 8		

3 结　论

使用声光调 Q 法能够实现封离式 CO_2 激光器的高重复频率脉冲输出。文中介绍了声光 Q 开关和声光调 Q CO_2 激光器的结构和工作原理，通过选择适当的调制信号电压和占空比，对不同重复频率下的脉冲输出特性进行了测量和分析，并对激光器的光束指向稳定性进行了测量。实验结果证明：该激光器实现了重复频率 1~100 kHz 的激光输出，在重复频率为 1 kHz 时，获得最小脉冲宽度 252 ns，最大峰值功率 7 579 W。通过设计以殷钢管为主体的稳定支撑架，使得激光器的稳定性较好，其中，高重复频率下的脉冲幅值不稳定性小于 3%，光束指向稳定性为 46.6 μrad。该声光调 Q CO_2 激光器证明了声光调 Q 技术能够用于产生高重复频率、高稳定性的 CO_2 激光脉冲，为 CO_2 激光器在 EUVL 等领域的应用提供了可行的技术途径。

参考文献：

[1] Wu B, Kumar A. Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuit–a review [J]. ***Applied Physics Reviews-Focused Review***, 2014(1): 011104.

[2] Brandt D C, Fomenkov I V, Farrar N R, et al. CO_2/Sn LPP EUV Sources for device development and HVM [C]// Conference on Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, 2013: 8679: 86791G.

[3] Ohta T, Nowak K M, Suganuma T, et al. Development of the reliable high power pulsed carbon dioxide laser system for LPP EUV light source [C]//Conference on Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography III, 2012: 8322: 83222O.

[4] Xie Jinjiang, Li Dianjun, Zhang Chuansheng, et al. Acousto-optically Q–switched CO_2 laser [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(5): 1008–1013. (in Chinese)
谢冀江，李殿军，张传胜，等. 声光调 Q CO_2 激光器[J]. **光学 精密工程**, 2009, 17(5): 1008–1013.

[5] Xu Y G. Theoretical study on phase-locking of a radial array CO_2 laser[J]. ***Optics Communications***, 2014(331): 244–250.

[6] Wang Yunfei, Wu Jin, Liu Shiming, et al. Tunable characteristic of long pulse TE CO_2 laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(2): 226–229. (in Chinese)
王云飞，吴谨，刘世明，等. 长脉冲 TE CO2 **激光器的调谐特性**[J]. **红外与激光工程**, 2008, 37(2): 226–229.

[7] Zheng Yijun, Tan Rongqing, Wang Donglei, et al. Novel high repetition-rate pulse CO_2 laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(10): 2697–2701. (in Chinese)
郑义军，谭荣清，王东雷，等. 新型高重复频率脉冲 CO_2 激光器[J]. **红外与激光工程**, 2013, 42(10): 2697–2701.

[8] Zhang Y C, Tian Z S, Sun Z H, et al. High pulse repetition frequency RF excited waveguide CO_2 laser with mechanical Q–switching[J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2013, 58: 12–14.

[9] Zhang Y C, Tian Z S, Sun Z H, et al. Study of frequency stabilization for electro-optical Q–switched radio-frequency-excited waveguide CO_2 laser using build-up time method [J]. ***Applied Optics***, 2013, 52(16): 3732–3736.

[10] Xie J J, Guo R H, Li D J, et al. Theoretical calculation and experimental study of acousto-optically Q–switched CO_2 laser [J]. ***Optics Express***, 2010, 18(12): 12371–12380.

[11] Ge Ruirong, Dong Xiangqun, Lin Peihui, et al. Analysis on argon arc welding process and properties of dissimilar metal stainless steel-invar [J]. ***Hot Working Technology***, 2014, 43(13): 201–202. (in Chinese)
葛瑞荣，董向群，林培辉，等. 不锈钢–殷钢异种金属弧焊接工艺及性能分析[J]. **热加工工艺**, 2014, 43(13): 201–202.

[12] Wang Gang, Wang Shiyu, Cai Defang, et al. Study on the effect of diffraction efficiency on pulse compression of A–O Q–switched laser [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2006, 35(1): 13–15. (in Chinese)
王刚，王石语，蔡德芳，等. 声光调 Q 衍射效率对脉宽压缩的影响研究[J]. **光子学报**, 2006, 35(1): 13–15.