

# 合束方式提高准分子激光输出脉冲能量稳定性

刘墨林<sup>1</sup>, 刘嘉仪<sup>1</sup>, 王怡哲<sup>1</sup>, 喻学昊<sup>1</sup>, 方晓东<sup>1,2</sup>, 游利兵<sup>1,2</sup>

(1. 深圳技术大学 新材料与新能源学院, 广东 深圳 518118;  
2. 深圳盛方科技有限公司, 广东 深圳 518173)

**摘要:** 为了获得稳定性更好、能量更大的准分子激光输出脉冲, 对合束方式提高输出脉冲能量稳定性的可行性进行了理论推导、模拟实验以及合束实验研究。从理论推导得知, 当激光输出脉冲能量符合正态分布时, 多台激光器合束可以降低输出能量相对标准差。对三台输出脉冲能量分布特性符合正态分布的准分子激光器进行合束模拟实验研究, 每台输出脉冲能量平均值约为 153 mJ, 脉冲能量相对标准差约为 1%。两台准分子激光器合束时得到输出脉冲能量平均值为 305 mJ、能量相对标准差为 0.7% 的准分子激光脉冲。三台准分子激光器合束时可以得到输出能量平均值为 458 mJ、能量相对标准差为 0.6% 的准分子激光脉冲。使用两台准分子激光器进行三次实际合束实验, 其中两台准分子激光器三次合束分别输出能量平均值约为 355、350、330 mJ, 相对标准差为 1.3%、1.2%、1.4% 的激光脉冲; 三次合束后分别得到能量平均值为 687、694、646 mJ, 相对标准差为 0.86%、0.79%、0.83% 的激光脉冲。模拟实验以及合束实验都表明, 合束后的能量相对标准差均小于单台能量相对标准差, 即合束提高准分子输出脉冲的稳定性。因此, 当单台准分子激光输出脉冲能量符合正态分布且平均能量相当时, 多台合束可以有效提高激光输出脉冲的能量稳定性。

**关键词:** 准分子激光; 脉冲能量; 稳定性; 相对标准差

**中图分类号:** TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230309

## 0 引言

紫外准分子激光具有短波长、大功率和窄线宽等特点, 广泛应用于半导体光刻、新型显示制造、角膜屈光度校正等<sup>[1]</sup>。无论是在医疗、工业和平板加工还是科研领域, 准分子激光的脉冲能量稳定性都是十分重要的参数, 其直接决定了手术的精度、加工的关键尺寸、材料处理的均匀度等<sup>[2-3]</sup>。

研究表明, 影响准分子激光脉冲能量稳定性的因素主要有: 工作气体的组成与比例、气体循环系统、激励源稳定度、激光共振放大机制等。1) 工作气体的组成与比例: 激光腔内的气体成分, 如辅助气体、卤素气体浓度等, 与激光器的效率直接相关, 而激光器生产效率又对脉冲能量稳定性产生影响, 具体的激光

器需要配合不同气体成分进行工作, 满足脉冲能量稳定性的需要; 2) 气体循环系统: 气体流量发生改变, 从而影响激光器的辉光放电, 进而影响准分子脉冲能量稳定性; 3) 激励源的稳定性: 决定了注入工作气体的能量稳定性, 对激光能量稳定性有很大影响; 4) 激光共振放大机制: 通过改变放大器的结构, 影响激光在放大器中的运动状态, 从而对激光脉冲能量稳定性产生影响<sup>[4-6]</sup>。

受上述因素的限制, 目前准分子激光的能量稳定性一般在 1%~2% 附近波动, 很难进一步提高<sup>[7]</sup>。然而, 脉冲能量稳定性直接影响着工业生产、医疗与科研的发展<sup>[8]</sup>。在集成电路制造领域, 光刻工艺决定了器件的关键尺寸, 而曝光光源直接影响了光刻的质

收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62175167); 广东省科技计划项目 (2021QN02Z552); 广东省重点建设学科科研能力提升项目 (2021ZDJS112); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20210324120207021, JSGG20220831094202005, KQTD20170331115422184)

作者简介: 刘墨林, 男, 硕士生, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究。

导师简介: 游利兵, 男, 教授, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。

量,激光光源的不稳定可能造成图案的变形和套准效果不佳;此外,在平板显示制造领域,准分子激光常用于激光退火工艺,利用激光输出的脉冲信号对材料进行退火处理,将非晶态的硅层转化成多晶硅。为了达到应用目的,器件的迁移率需达到一定的要求。其中,激光脉冲能量一定程度上会影响重结晶的稳定性,而退火的重结晶过程直接关系到器件的迁移率。提高激光脉冲能量的稳定性可以降低重结晶的不稳定性从而使器件迁移率得到增加<sup>[9]</sup>。因此,在现有技术基础上进一步提升准分子激光的输出能量稳定性具有重要意义。在实际使用中发现,两台准分子激光器合束使用时,在提高输出功率的同时,脉冲能量的稳定性也得到了一定的改善。通过合束的方式进一步提高准分子激光输出稳定性可能是一个潜在的有效手段,有望突破现有的单台准分子激光极限相对标准差。因此,深入研究合束对于准分子激光单脉冲能量稳定性的影响规律具有重要的应用意义。

## 1 合束方式提高输出脉冲能量稳定性的理论分析

### 1.1 准分子激光脉冲能量稳定性评估方法

#### 1.1.1 紫外准分子激光脉冲能量稳定性评估方法

目前,评估准分子激光的脉冲能量稳定性主要用  $\sigma$  参数来进行判断。 $\sigma$  参数通常定义为在固定时间窗内脉冲能量偏离脉冲能量均值的程度<sup>[10-11]</sup>。脉冲能量稳定性是衡量准分子激光光源应用特性的重要指标。然而,目前国内外对激光合束后的脉冲能量稳定性的评估与优化方法仍然缺乏系统的理论研究。因此,通过对激光脉冲能量稳定性进行理论分析,研究激光合束后准分子激光的  $\sigma$  参数,进一步探索对于紫外准分子激光脉冲能量稳定性的评估与优化方法。

准分子激光脉冲能量稳定性是指在一定时间段内,激光器输出脉冲能量偏离均值的情况。根据 Pflanz T 的研究<sup>[12]</sup>,理想情况下,准分子激光脉冲输出能量应该符合正态分布,即  $E_j \sim N(E_j, \sigma_j^2)$ 。

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (1)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_j - E_i)^2 \quad (2)$$

式中: $j$  为脉冲序数; $E_i$  为能量平均值; $\sigma_i^2$  为能量方差。

目前,评估准分子激光的脉冲能量稳定性主要用相对标准差  $\sigma_{\%}$  参数来进行判断。

由于脉冲能量  $\sigma_{\%}$  参数为相对值,随激光器输出的平均能量值变化,因此表达式为:

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma_p}{E_p} \times 100\% \quad (3)$$

$$E_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j = E_i \quad (4)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_j - E_p)^2} = \sigma_i \quad (5)$$

式中: $n$  表示激光脉冲个数; $E_p$  表示  $n$  个脉冲能量的平均能量; $\sigma_p$  表示  $n$  个脉冲能量的标准差。

根据上述表达式可知,当  $\sigma_{\%}$  参数的值越小时,说明脉冲能量更加稳定<sup>[13]</sup>。

### 1.2 正态分布的激光脉冲合束时相对标准差变化的理论推导

#### 1.2.1 不同参数脉冲激光器合束时稳定性的变化

若有两台脉冲激光器合束,理想情况下,由于准分子激光脉冲输出能量波动性符合正态分布,则两台激光器发出的激光脉冲分别服从  $E_1 \sim N(E_1, \sigma_1^2)$ ,  $E_2 \sim N(E_2, \sigma_2^2)$  的正态分布,由于两台激光束是进行非相干合束,可以视为相互独立。由正态分布的可加性可知<sup>[14-15]</sup>,其合束激光脉冲服从  $E_c \sim N(E_1 + E_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ ,脉冲激光相对标准差  $\sigma_{\%c}$  的表达式为:

$$\sigma_{\%c} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{E_1 + E_2} \times 100\% \quad (6)$$

同理, $n$  台脉冲激光器进行非相干合束时,脉冲激光相对标准差  $\sigma_{\%c}$  的表达式为:

$$\sigma_{\%c} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_n} \times 100\% \quad (7)$$

#### 1.2.2 相同参数脉冲激光器合束时的稳定性变化

实际应用中最常见的合束情况就是把多台能量和稳定性相当的脉冲激光器进行合束。理想情况下,两台激光器发出的脉冲激光符合相同的正态分布,即  $E_1 \sim N(E, \sigma^2)$ ,  $E_2 \sim N(E, \sigma^2)$ ,由于两台激光束是进行非相干合束,可以视为相互独立,由正态分布的可加性可知,其合束激光脉冲服从  $E_c \sim N(2E, 2\sigma^2)$ ,其脉冲激光相对标准差  $\sigma_{\%c}$  的表达式为:

$$\sigma_{\%c} = \frac{\sqrt{2\sigma^2}}{2E} \times 100\% \quad (8)$$

相对于合束前的  $E_1 \sim N(E, \sigma^2)$ , 脉冲激光相对标准差:

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma}{E} \times 100\% \quad (9)$$

显然  $\sigma_{\%c} < \sigma_{\%}$ , 相对标准差参数的值越小, 脉冲能量越稳定, 即通过合束提高了脉冲激光的输出稳定性。

同理, 如果把  $n$  台符合相同正态分布的脉冲激光束进行合束, 其脉冲激光相对标准差  $\sigma_{\%c}$  的表达式为:

$$\sigma_{\%c} = \frac{\sqrt{n}\sigma^2}{nE} \times 100\% \quad (10)$$

## 2 合束提高输出激光脉冲稳定性的实验模拟

### 2.1 准分子激光输出脉冲特性测试

对三台 PLD20 型准分子激光器进行脉冲能量测试, 分别进行 10000 脉冲能量分布记录, 采用 Origin 软件对数据进行统计分析, 结果如表 1 所示。

表 1 激光器输出脉冲参数统计

Tab.1 Statistics of laser output pulse parameters

Data number	Energy average/mJ	Standard deviation	Relative standard deviation
1	152.2	1.62	1.06%
2	152.9	1.34	0.88%
3	153.3	1.46	0.95%

三组脉冲能量分布数据经过曲线拟合, 见图 1。

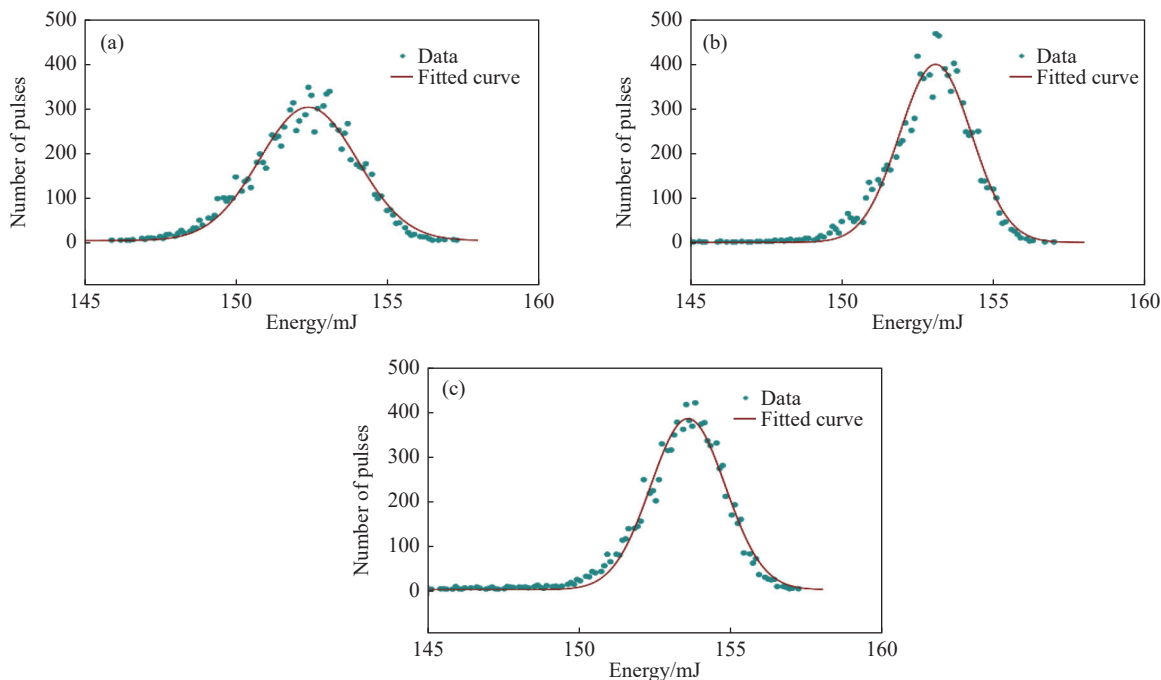


图 1 (a) 1 号数据正态分布曲线拟合图; (b) 2 号数据正态分布曲线拟合图; (c) 3 号数据正态分布曲线拟合图

Fig.1 (a) Fitting diagram of normal distribution curve of No.1 data; (b) Fitting diagram of normal distribution curve of No.2 data; (c) Fitting diagram of normal distribution curve of No.3 data

从图 1 中可以看出, 三组数据均符合正态分布曲线拟合。能量平均值分别为 152.2、152.9、153.3 mJ、相对标准差  $\sigma_{\%}$  分别为 1.06%、0.88%、0.95%。三台激光器脉冲激光输出的能量与稳定性非常相近, 可以用于模拟参数相当激光器合束进行下一步实验。

### 2.2 模拟两台激光器合束

由于是模拟不相干合束, 将上述三组数据任选两

组进行叠加模拟, 将其叠加后的 10000 个脉冲的能量分布进行统计记录, 将 1 号与 2 号数据的合束结果记为 4 号数据, 合束后脉冲能量分布数据经过曲线拟合, 如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 合束后的激光脉冲依旧符合正态分布。采用 Origin 软件对数据进行统计分析, 数据分析结果如表 2 所示。

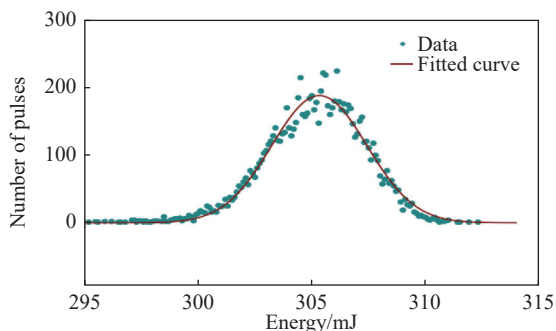


图 2 4 号数据正态分布曲线拟合图

Fig.2 Fitting diagram of normal distribution curve of No.4 data

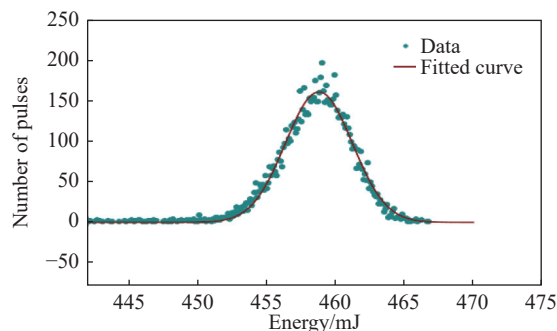


图 3 1 号、2 号、3 号数据模拟合束正态分布曲线拟合图

Fig.3 Fitting diagram of normal distribution curve of No.1, No.2 and No.3 data simulation

表 2 两台激光器合束输出脉冲参数统计

Tab.2 Statistics of output pulse parameters of any two laser beams

Parameter	Value
Data number	4
Energy average/mJ	305.1
Standard deviation	2.14
Relative standard deviation	0.70%
Theoretical standard deviation	0.69%
Actual theoretical error	1.4%

表 2 中: 相对标准差 (Relative standard deviation)  $\sigma_{\%}$  是使用能量叠加后的数据实际的标准差以及能量平均值计算得到的结果; 理论标准差 (Theoretical standard deviation)  $\sigma_{\%t}$  是由公式 (6) 推导出来的公式计算结果; 实际理论误差 (Actual theoretical error) 是相对标准差与理论标准差差值的绝对值除理论标准差得到的, 其公式为:

$$A = \frac{|\sigma_{\%c} - \sigma_{\%t}|}{\sigma_{\%t}} \times 100\% \quad (11)$$

如表 2 所示, 两台激光器合束后激光脉冲的能量平均值分别为 305.1 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%c}$  为 0.70%, 相对标准差的值都相对于单台激光器的相对标准差的值有所降低, 而相对标准差的值降低说明输出的脉冲激光能量更加稳定。同时, 可以根据实际理论误差得出, 相对标准差与理论标准差的差距很小, 在可接受的误差范围内, 也证明 1.2 节中的理论推导是成立的。

### 2.3 模拟三台激光器合束

最后, 将 1 号、2 号、3 号三组数据进行叠加模拟, 合束后脉冲能量分布数据经过曲线拟合, 如图 3 所示。

从图 3 可知, 合束后的激光脉冲依旧符合正态分

布。采用 Origin 软件对数据进行统计分析, 数据分析结果如表 3 所示。

表 3 中: 相对标准差  $\sigma_{\%}$  是使用能量叠加后的数据实际的标准差以及能量平均值计算得到的; 理论标准差  $\sigma_{\%t}$  是由公式 (7) 推导出来的公式计算结果; 实际理论误差是相对标准差与理论标准差差值的绝对值除理论标准差得到的。

表 3 三台激光器合束输出脉冲参数统计

Tab.3 Statistics of combined output pulse parameters of three lasers

Parameter	Value
Data number	1+2+3
Energy average/mJ	458.5
Standard deviation	2.77
Relative standard deviation	0.60%
Theoretical standard deviation	0.56%
Actual theoretical error	7.1%

可以看出, 将三台激光器合束后的激光脉冲的能量平均值为 458.48 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%c}$  为 0.60%。相对于单台激光器以及任意两台激光器合束的激光脉冲, 相对标准差的值均有所下降, 即输出的激光脉冲更加稳定。同时, 可以根据实际理论误差得出相对标准差与理论标准差的差距很小, 在可接受的误差范围内, 证明 1.2 节中的理论推导是成立的。

## 3 合束提高输出激光脉冲稳定性实验

### 3.1 两台准分子激光器合束

根据上述实验模拟, 为了进一步对推导公式进行

验证,对一台 PLD20 型准分子激光器以及一台 PLD30 型准分子激光器进行合束脉冲能量测试,按照图 4 示意搭建非相干合束的光路系统<sup>[16]</sup>,分别进行三次合束实验,每次都统计单台激光器 10 000 个脉冲能

量以及合束后的 10 000 个脉冲能量,采用 Origin 软件对数据进行统计分析,结果如表 4 所示。

三组合束脉冲能量分布数据经过曲线拟合,如图 5 所示。

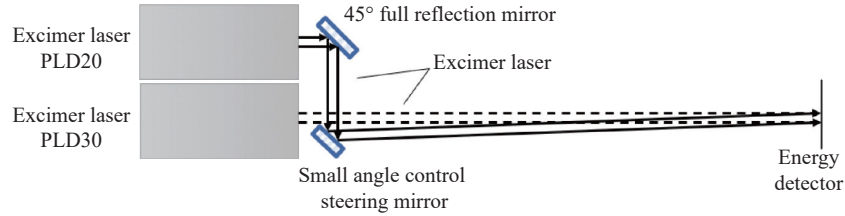


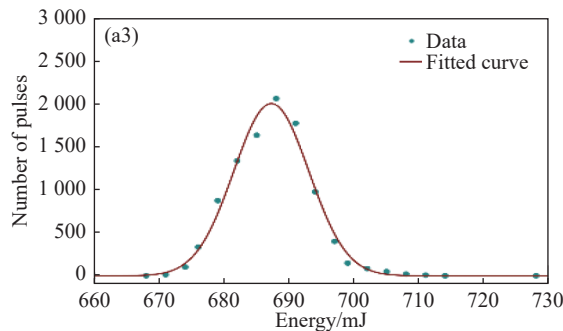
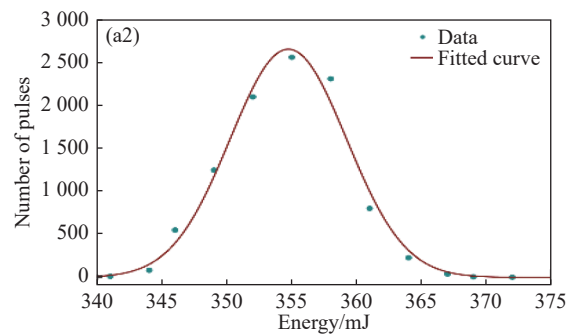
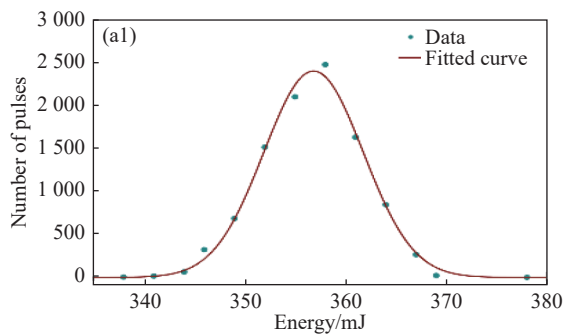
图 4 准分子合束光路示意图

Fig.4 Schematic diagram of excimer beam combining optical path

表 4 实际合束激光器输出脉冲参数统计

Tab.4 Statistics of output pulse parameters of actual combined beam laser

Data number	Equipment number	Energy average/mJ	Standard deviation	Relative standard deviation	Theoretical standard deviation	Actual theoretical error
1	PLD20	356.6	4.95	1.39%	-	-
	PLD30	354.5	4.41	1.24%	-	-
	Laser beam combination	687.2	5.95	0.86%	0.93%	7.52%
2	PLD20	368.4	4.19	1.14%	-	-
	PLD30	354.5	4.41	1.24%	-	-
	Laser beam combination	694.5	5.54	0.79%	0.84%	5.95%
3	PLD20	328.4	4.89	1.49%	-	-
	PLD30	331.4	4.50	1.35%	-	-
	Laser beam combination	646.8	5.40	0.83%	1.00%	17.00%



(a)



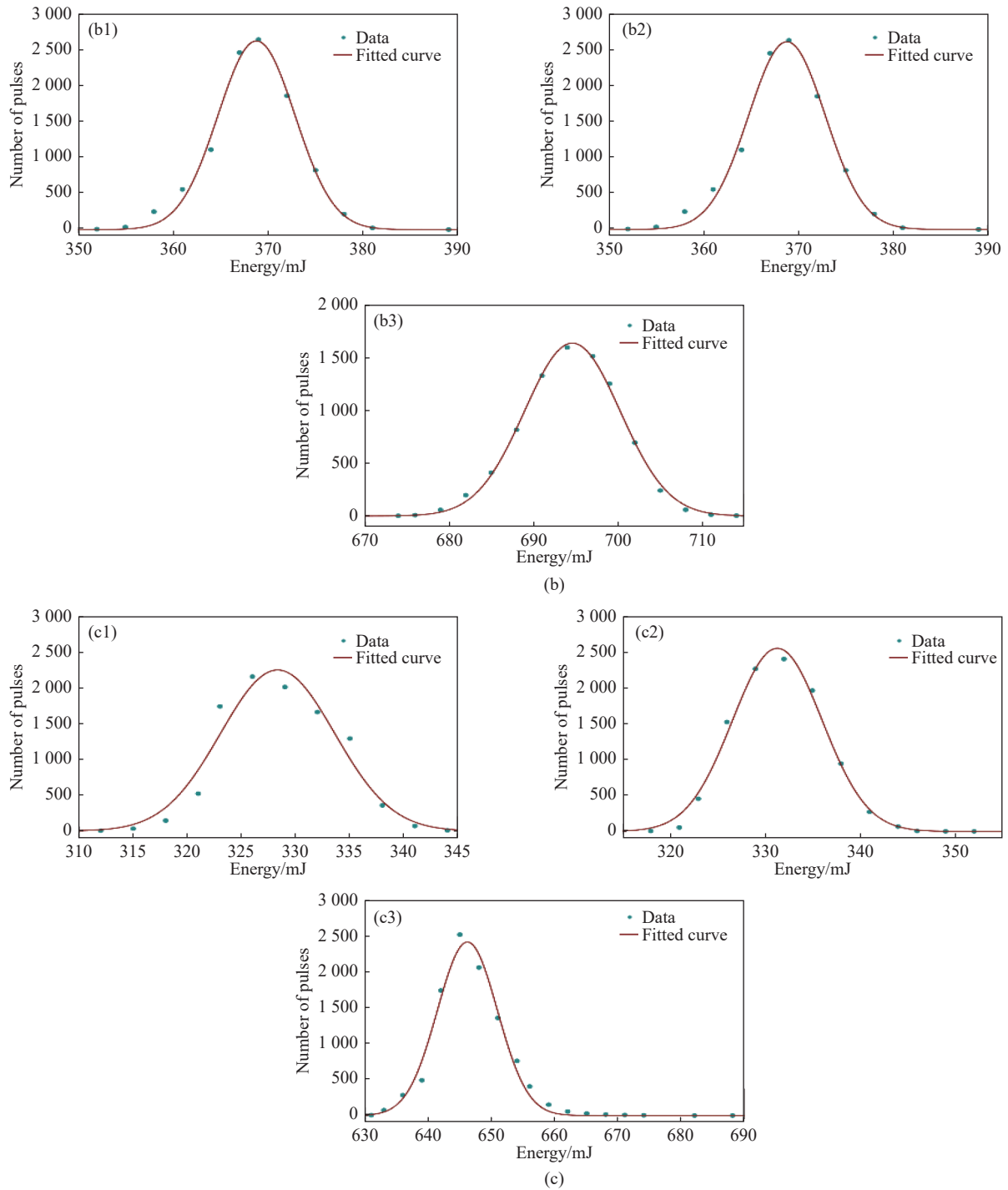


图 5 (a) 依次为第一次合束时 PLD20、PLD30、合束后的正态分布曲线拟合图；(b) 依次为第二次合束时 PLD20、PLD30、合束后的正态分布曲线拟合图；(c) 依次为第三次合束时 PLD20、PLD30、合束后的正态分布曲线拟合图

Fig.5 (a) Fitting curves of the normal distribution curves of PLD20, PLD30, and after the first laser beam combination; (b) Fitting curves of the normal distribution curves of PLD20, PLD30, and after the second laser beam combination; (c) Fitting curves of the normal distribution curves of PLD20, PLD30, and after the third laser beam combination

如表 4 所示, 三次合束实验中, PLD20 分别输出能量平均值为 356.6、368.4、328.4 mJ, 相对标准差为

1.39%、1.14%、1.49% 的激光脉冲; PLD30 分别输出能量平均值为 354.5、354.5、331.4 mJ, 相对标准差为

1.24%、1.24%、1.35% 的激光脉冲。三次合束后分别得到能量平均值为 687.2、694.5、646.8 mJ, 相对标准差为 0.86%、0.79%、0.83% 的激光脉冲。如图 5 所示, 合束前单台激光的激光脉冲与合束后的激光脉冲依旧符合正态分布。可以看出, 实际合束后激光脉冲相对标准差的值都相对于单台激光器相对标准差的值有所降低, 而相对标准差的值降低说明输出的脉冲激光能量更加稳定。根据前两次合束的实际理论误差得出, 相对标准差与理论标准差的差距很小, 在可接受的误差范围内。第三次合束可能是由于能量衰减等问题, 实际相对标准差相较于理论标准差差距过大, 但依旧存在合束后脉冲能量稳定性提高的现象。

#### 4 结 论

文中首先根据正态分布的可加性, 对高斯光束非相干合束时, 合束脉冲能量相对标准差进行了公式推导。第二步采用模拟激光器非相干合束的方式, 得到了输出脉冲更加稳定、能量更高的激光脉冲。用原能量平均值分别为 152.2、152.9、153.3 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%}$  分别为 1.06%、0.88%、0.95% 的三台 PLD20 型准分子激光器模拟合束。将两台激光器模拟合束后, 得到能量平均值为 305.1 mJ、相对标准差  $\sigma_{\%c}$  为 0.70% 的合束激光脉冲。将三台激光器一起合束后得到能量平均值为 458.5 mJ、相对标准差  $\sigma_{\%c}$  为 0.60% 的合束激光脉冲。第三步使用一台 PLD20 准分子激光器与一台 PLD30 准分子激光器进行三次合束实验, PLD20 分别输出能量平均值为 356.6、368.4、328.4 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%}$  为 1.39%、1.14%、1.49% 的激光脉冲; PLD30 分别输出能量平均值为 354.5、354.5、331.4 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%}$  为 1.24%、1.24%、1.35% 的激光脉冲。三次合束后分别得到能量平均值为 687.2、694.5、646.8 mJ, 相对标准差  $\sigma_{\%}$  为 0.86%、0.79%、0.83% 的激光脉冲。

从理论推导、模拟合束数据以及实际合束数据可以得到, 多台输出激光脉冲参数相近的激光器经过合束可以在提高激光器输出激光脉冲能量的同时降低输出激光脉冲的相对标准差, 即提高激光脉冲的稳定性, 对于解决准分子激光能量较低以及提高准分子脉冲能量稳定性提供了一种新的思路。文中根据统计学理论进行了相应推导和分析, 并通过对准分子激光

的实际合束进行了理论验证, 进一步检验合束方式, 提高输出激光脉冲稳定性的实用性。

#### 参考文献:

- [1] Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, et al. Progress of excimer lasers technology (invited paper) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2253-2270. (in Chinese)
- [2] Lou Qihong. Progress of excimer lasers and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, 21(5): 361-364, 440. (in Chinese)
- [3] Liu Jingru. Excimer Laser Technology and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [4] Zhao Duliang. Study on key techniques of medical and industrial excimer laser system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [5] Borisov V M, Demin A I, Eltsov A V, et al. Development of next generation excimer lasers for industrial applications [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5137: 241-249.
- [6] Bragin I, Misyuryaev T, Targsdorf A, et al. Advances in industrial high-power excimer laser technology [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7131: 71311B.
- [7] Goertler R, Strowitzki C. Progress in the development of compact excimer lasers [C]//International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, SPIE, 2005, 5777: 562-565.
- [8] Shi Haiyan, Zhao Jiangshan, Song Xingliang, et al. Analysis on factors affecting energy stability of excimer laser for lithography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3540-3546. (in Chinese)
- [9] Yin Guangyue. Study of key technologies of excimer laser annealing equipments [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [10] Webb C. History of gas lasers, part 2: pulsed gas lasers [J]. *Optics and Photonics News*, 2010, 21(2): 20-27.
- [11] Fan Yuanyuan, Zhou Yi, Guo Xin, et al. Development status and trend of china's excimer laser technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 29-34. (in Chinese)
- [12] Pflanz T, Huber H. Compact excimer laser light source for optical (mask) inspection systems [C]//European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits & Microcomponents. International Society for Optics and Photonics, 2001.
- [13] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534.

- (in Chinese) Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [14] Yuan Demei, An Jun, Tao Bao. Probability and Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [15] Jiang Haifeng, Zhuang Jian, Liu Zhulin. Probability and Statistics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [16] Cao Yuxuan, Shu Shili, Sun Fangyuan, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)

## Improvement of the stability of excimer laser output pulse energy by beam combination

Liu Molin<sup>1</sup>, Liu Jiayi<sup>1</sup>, Wang Yizhe<sup>1</sup>, Yu Xuehao<sup>1</sup>, Fang Xiaodong<sup>1,2</sup>, You Libing<sup>1,2</sup>

(1. College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;

2. Shenzhen Shengfang Technology Co., Ltd., Shenzhen 518173, China)

### Abstract:

**Objective** UV excimer lasers have the characteristics of short wavelength, high power and narrow linewidth, and are widely used in semiconductor lithography, new display manufacturing, corneal refractive correction, etc. Whether in the fields of medical treatment, industry, flat panel processing, or scientific research, the pulse energy stability of excimer lasers is a very important parameter, which directly determines the accuracy of surgery, the critical dimensions of processing, and the uniformity of material processing. Limited by the composition and proportion of working gas, gas circulation system, stability of excitation source, laser resonance amplification mechanism, etc., the energy stability of excimer laser pulses output by current excimer lasers generally fluctuates around 1%-2%, and it is difficult to further improve. However, the pulse energy stability directly affects the development of industrial production, medical treatment, and scientific research. For example, in the field of integrated circuit manufacturing, the lithography process determines the key dimensions of the device, while the exposure light source directly affects the quality of lithography. The instability of the laser light source may cause pattern deformation and poor registration effect. Therefore, it is of great significance to further improve the output energy stability of excimer lasers based on the existing technology. In practical use, it has been found that when two excimer lasers are used in beam combination, the pulse energy stability is also improved to some extent while the output power is increased.

**Methods** In order to obtain more stable and powerful excimer laser output pulses, theoretical derivation, simulation experiments, and beam combination experiments were conducted to investigate the feasibility of improving the stability of output pulse energy through beam combination. Theoretical derivation showed that when the laser output pulse energy follows a normal distribution, beam combination of multiple lasers with similar parameters can reduce the relative standard deviation of output energy. Subsequently, beam combination simulation experiments and actual beam combination experiments were conducted.

**Results and Discussions** The simulation experiment of beam combination for three excimer lasers with output pulse energy distribution characteristics consistent with normal distribution was conducted. The output pulse energies were 152.2 mJ, 152.9 mJ, and 153.3 mJ, respectively, with relative standard deviations of 1.06%, 0.88%, and 0.95%. Among them, two excimer lasers achieved an average output pulse energy of 305 mJ and a relative standard deviation of 0.7% when combined. Three excimer lasers achieved an average output energy of 458 mJ and a relative standard deviation of 0.6% when combined. Three actual beam combination experiments were



conducted using one PLD20 excimer laser and one PLD30 excimer laser (Fig.4). The average output energies of PLD20 were 356.6 mJ, 368.4 mJ, and 328.4 mJ, with relative standard deviations of 1.39%, 1.14%, and 1.49%, respectively. The average output energies of PLD30 were 354.5 mJ, 354.5 mJ, and 331.4 mJ, with relative standard deviations of 1.24%, 1.24%, and 1.35%, respectively. After three beam combinations, the average output energies were 687.2 mJ, 694.5 mJ, and 646.8 mJ, with relative standard deviations of 0.86%, 0.79%, and 0.83%, respectively. The relative standard deviation values of the laser pulses after actual beam combination were all lower than those of the single laser (Tab.4). The decrease in the relative standard deviation value indicates that the output pulse laser energy is more stable.

**Conclusions** From theoretical derivation, simulated beam combination data, and actual beam combination data, it can be concluded that multiple lasers with similar output laser pulse parameters can improve the output laser pulse energy of the lasers while reducing the relative standard deviation of the output laser pulses, thereby improving the stability of the laser pulses. When two lasers with similar parameters are combined, the energy can reach 1.9 times that of a single laser, and the relative standard deviation can be reduced to 0.6-0.7 times that of a single laser.

**Key words:** excimer laser; pulse energy; stability; relative standard deviation

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62175167); Guangzhou Science and Technology Plan Project (2021QN02Z552); Guangdong Province Key Construction Discipline Research Capacity Enhancement Project (2021ZDJS112); Shenzhen Science and Technology Plan Project (JCYJ20210324120207021, JSGG20220831094202005, KQTD20170331115422184)