

激光与光电子学进展

放电泵浦深紫外准分子激光关键技术与应用

梁勳^{1*}, 沈启辉^{1,2}, 邵景珍¹, 林颖¹¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 准分子激光是大功率输出的深紫外波段激光光源, 在多方面具有独特的应用, 然而国内的准分子激光行业在关键技术、高端产品等方面和国外仍有一定差距, 存在着“卡脖子”的状况。首先介绍了准分子激光的基本特性、应用分类、国内外的的发展情况等; 其次着重介绍了放电泵浦准分子激光的基本结构和目前实用器件的多项关键技术, 主要包括快脉冲激励源、气体放电腔、光学谐振腔等; 最后, 介绍了放电泵浦准分子激光在工业、医疗、科研等领域目前的主要应用和进展, 分析了其中的一些独特的关键技术。

关键词 激光光学; 准分子激光; 放电泵浦; 深紫外

中图分类号 TN248.2 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221521

Discharge-Pumped Excimer Laser Technologies and Applications

Liang Xu^{1*}, Shen Qihui^{1,2}, Shao Jingzhen¹, Lin Ying¹¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract Excimer laser is a kind of deep-ultraviolet laser source with high power output, which has unique applications in many aspects. However, there is still a gap between the domestic excimer laser industry and foreign countries in key technologies and high-end products, and there is a situation of stuck neck. First, this paper introduces the basic characteristics, application classification, briefly development and status of excimer laser. Second, the basic structure and some key technologies of practical devices of discharge-pumped excimer laser are introduced, including fast pulse excitation source, gas discharge cavity, optical resonator and so on. Finally, the main applications and progress of discharge-pumped excimer laser in industry, medical treatment, scientific research, and other fields are introduced, as well as some unique key technologies.

Key words laser optics; excimer laser technology; discharge-pumped; deep-ultraviolet

1 引 言

准分子激光是大功率输出的深紫外(DUV)波段激光光源, 具有波长短、光子能量高、脉冲宽度窄、峰值功率高等优势, 在工业、医疗和科研等领域显示出巨大的应用价值^[1]。

准分子是一种在激发态复合成分子, 而在基态离解成原子的不稳定缔合物, 其激光跃迁发生在束缚的激发态到排斥的基态, 属于束缚-自由跃迁^[2], 英文名称 excimer 来源于 excited dimer, 意为激发态的双原子

分子。准分子下能态为排斥态或弱束缚态, 是一种非常理想的激光介质, 自 1970 年 Basov 等^[3]采用强流电子束激发液态氙得到 Xe₂ 准分子激光输出以来, 准分子激光器得到了迅速发展, 实现了稀有气体准分子激光(如 Ar₂、Kr₂、Xe₂ 等)、稀有气体卤化物准分子激光(如 ArF、XeF、XeCl 等)、卤素气体准分子激光(如 F₂ 等)、稀有气体和卤素气体三原子准分子激光(如 Ar₂Cl、Kr₂F、Xe₂Cl 等)等, 辐射波长处于真空紫外到可见光波段, 如图 1^[4]所示。

特别是其中的稀有气体卤化物准分子激光器, 由

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2022-06-30

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210007)、基础加强计划重点基础研究项目(2021-JCJQ-ZD-051-00-05)、中国科学院青促会资助项目(2018481)、国家自然科学基金(61307112)、国家科技重大专项(2009ZX02206-004, 2013ZX02202004)

通信作者: liangxu@aiofm.ac.cn

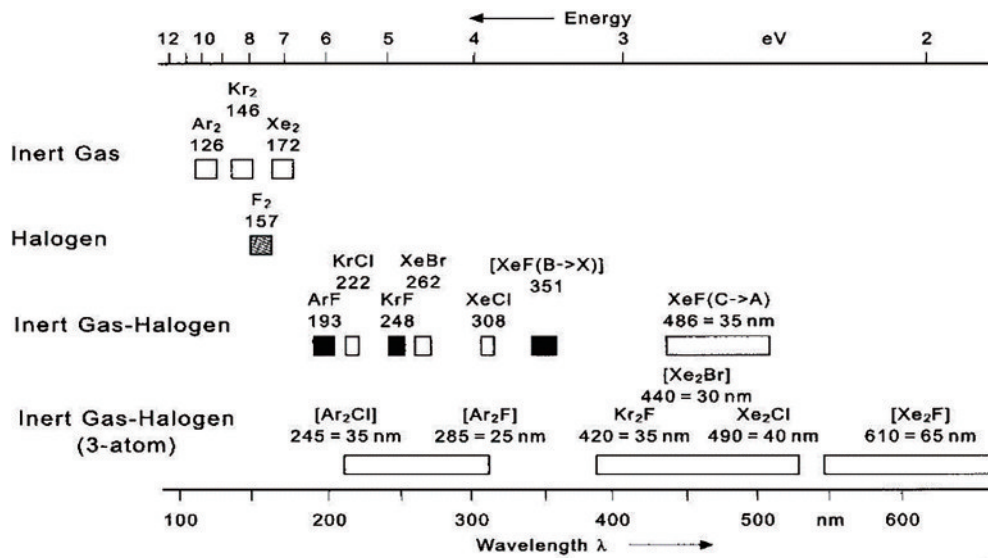


图 1 各类准分子激光发射带宽及光子能量示意图^[4]

Fig. 1 Diagram of emission bandwidth and photon energy of excimer laser^[4]

于其输出激光峰值功率高、脉冲能量大、波长在紫外区的特点,发展迅速并得到了广泛的应用,是目前主要使用的准分子激光器^[5],最常见的稀有气体卤化物准分子激光如表 1 所示。

表 1 常见准分子激光气体介质和输出波长

Table 1 Excimer gas media and emission wavelength

ArF	KrF	XeCl	XeF
193 nm	248 nm	308 nm	351 nm

目前的准分子激光系统,从应用类型上通常可以分为科学装置应用和民口应用两种。

科学装置或者军事应用中,通常利用准分子激光高增益、可定标放大到高能量等特点^[6],采用电子束泵浦的方式,获得大能量大功率激光输出。如美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)研制了高能 KrF 激光装置 AURORA^[7],英国卢瑟福·阿普尔顿实验室(RAL)研制了 TITANIA 装置^[8],日本电气技术研究所(ETL)研制了 SUPER-ASHURA 装置^[9],美国海军实验室(NRL)研制了 NIKE 装置^[10],俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所研制了 GARPUN 装置^[11]等。

国内,中国原子能科学研究院^[12-14]和西北核技术研究所^[15-17]在这方面开展了大量的研究工作,中国原子能科学研究院建成了 6 路 KrF 激光系统(100 J/23 ns)^[18],西北核技术研究院采用角多路和 EFISI 技术研制了 XeCl 激光打靶实验平台(18 路/100 J/1~10 ns),如图 2^[19]所示。

民口应用中,通常是利用了准分子激光深紫外波长输出、作用时间短、峰值功率高、物质吸收率高等特点,采用放电泵浦的方式,实现紧凑的工业、医疗和科研使用的仪器设备,形成广泛的商业应用^[5]。

国内这方面研究工作开始于 20 世纪 70 年代^[20],中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院上海光

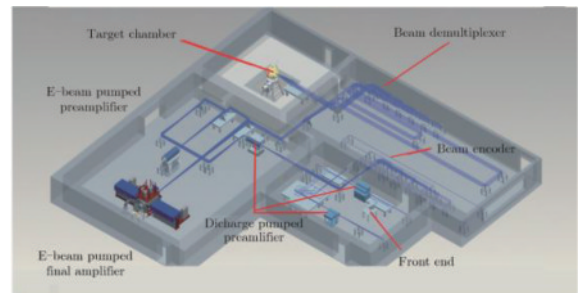


图 2 高功率准分子激光打靶实验平台布局^[19]

Fig. 2 Layout of high power excimer laser target experiment platform^[19]

学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、华中科技大学等单位开展了大量研究^[21-24],在“七五”“八五”“九五”期间获得了一系列的研究成果,技术水平与国外差距较小^[5]。但之后,国内缺乏研究资金的投入,而国外在将准分子激光引入半导体光刻生产领域后^[25-27],不断地提高技术水平,促进半导体行业发展的同时,也形成了对国内准分子激光工业应用关键技术和设备的“卡脖子”状态,被列入《瓦森纳协议》^[28]和美国商务部工业和安全局《商业管制清单》^[29]。

目前,在集成电路光刻领域,采用准分子激光作为光源的 DUV 光刻系统,依然是市场的主力,其中:DUV 准分子激光光源基本被荷兰 ASML(收购美国 Cymer 公司)、日本 Gigaphoton 所垄断;其他各种应用领域中,大部分市场被美国的 Coherent 公司(收购德国 Lambda Physik 和 Tui Laser)所占据;其余为数不多的准分子激光市场则被美国 GAM Laser、加拿大的 LightMachinery(原 Lumonics)、德国 ATL、MLase,以及俄罗斯 OptoSystem 等公司所瓜分。

自 2009 年起,国家科技重大专项“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”启动了对 193 nm 深紫外准

分子激光光刻机的攻关,在国内多个科研机构共同努力下,目前光刻用准分子激光光源基本达到了国际同类水平,即将开始国产化替代工作。但是在其他的应用领域,国内仍然集中于准分子激光的应用研究,相关关键技术和仪器设备目前仍然相当薄弱。

近年来,中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所持续开展放电泵浦准分子激光的产品化工作(图 3)^[30-32],目前已实现系列准分子激光设备的产业化,入选了中国科学院自主研发仪器设备^[33],在科研仪器设备领域形成了与国外准分子激光产品的竞争状态。

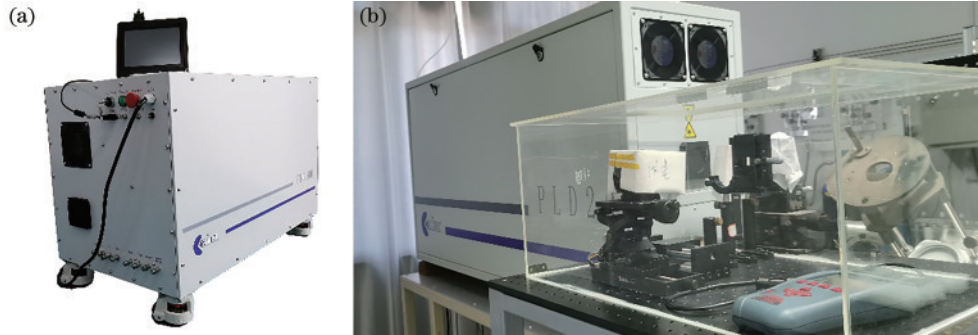


图 3 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所的系列准分子激光产品。(a) FBG 200 准分子激光器;(b) PLD 20 准分子激光器

Fig. 3 A series of excimer laser products of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. (a) FBG 200 excimer laser; (b) PLD 20 excimer laser

本文主要介绍放电泵浦准分子激光的基本结构、关键技术,以及目前的主要应用和进展。

2 基本结构和关键技术

图 4^[20,34]为典型的准分子位能曲线示意图,X为排斥基态,B为最低激发态,C为更高的激发态。准分子的特征谱是由最低激发态B到排斥基态X的跃迁,一般情况下,B态自发辐射寿命为 10^{-8} s量级,而基态X在 10^{-13} s内便发生离解。这种能级结构,使得准分子激光在理论上就存在着一些特点:

1) 基态 X 在 R_0 附近排斥,所以在 R_0 附近的 Franck-Condon 区内很容易建立起粒子数反转,能够获得很高的增益系数;

2) 跃迁终止于基态,不存在通常四能级系统的无辐射跃迁,因此有利于做成高效率激光器件;

3) 基态 X 在振动弛豫时间量级即排斥抽空,没有瓶颈效应的限制,所以超短脉冲、拉长脉宽以及高重复率运转都没有原则性问题;

4) 跃迁可以在 B 态 R_0 附近一定范围内发生,因此荧光谱为连续带,可以实现一定范围内可调谐的激光系统。

但另一方面,准分子激光介质辐射上能级的寿命很短,在 10^{-8} s量级,且泵浦过程必须与淬灭过程、碰撞和非辐射衰变过程等竞争,因此有效泵浦的难度较大,需要实现较高的泵浦功率密度,通常需要达到 MW/cm^3 量级^[4]。

高压气体放电激励技术几乎是目前实用化准分子激光系统中唯一使用的技术^[34],其基本结构如图 5^[4]所示。放电电极在高压快脉冲源的作用下放电,激励放电区的气体介质出光,产生的深紫外光在谐振腔内振

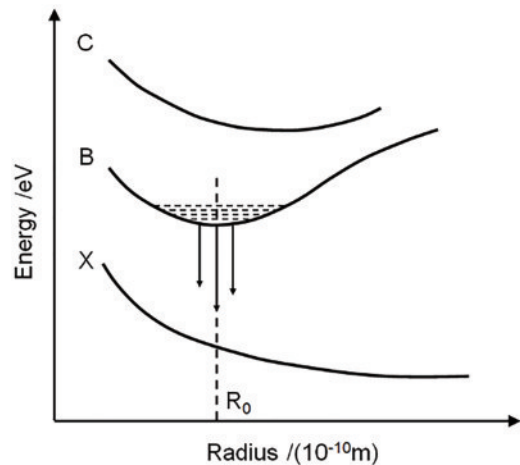


图 4 典型准分子位能曲线^[20,34]

Fig. 4 Typical excimer potential energy curves^[20,34]

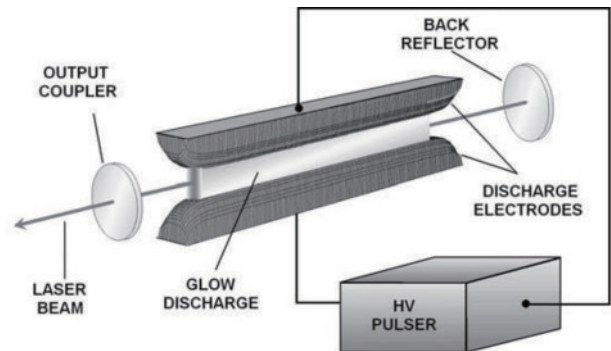


图 5 放电激励准分子激光结构示意图^[4]

Fig. 5 Structure diagram of excimer laser excited by discharge^[4]

荡放大,形成激光脉冲输出。这种快脉冲放电泵浦的方法可以实现准分子激光系统的 kHz 高重复频率运行,或者几焦耳的大脉冲能量输出。其中的最基本的

几个关键技术就是快脉冲激励源、气体放电腔和光学谐振腔。

2.1 脉冲激励源

脉冲激励源在放电泵浦准分子激光系统中起到脉冲能量的产生、传输,以及调整至所需的泵浦功率强度的作用。其高功率需求的实现原理在于先慢回路对储能电容器充电,然后通过快速回路放电的方式来实现^[35],但由于采用的高压开关不同,结构上主要有两种,基于气体闸流管开关的恒流(CC)能量转移回路,以及基于固态开关和磁开关的多级脉冲压缩回路。

自从实用化的放电泵浦准分子激光设备进入市场,就开始采用基于闸流管的CC快速能量转移回路,其典型电路原理如图6所示,储能电容Cs在高压的作用下充电储能,闸流管Thy触发导通后,Cs通过回路电感Lcc对放电电容器Cd进行能量转移,同时发生预电离过程。Cd电压上升至气体放电阈值后,通过回路电感Ld对电极间气体形成放电激励,从而形成激光输

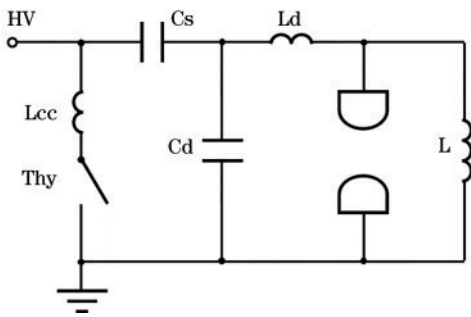


图6 基于闸流管的CC能量转移回路

Fig. 6 CC energy transfer circuit based on thyatron

出。其中:CC能量转移过程时间约100~200 ns;Cd放电过程由于其紧密耦合到激光头,因此Ld很小,放电时间通常在30~60 ns。

基于闸流管开关的CC能量转移回路由于其结构简单、性能稳定,仍然是目前较常见的实用准分子激光激励回路,但存在着一些问题,限制了其只适用于较低重复频率、中等脉冲能量的准分子激光系统中。

首先,回路对闸流管的性能参数要求较高,Cs通常储能高压20~30 kV,CC转移过程中峰值电流通常10~15 kA^[36], dI/dt 达到 $10^{11} \sim 10^{12}$ A/s量级,且随着重复频率增加,闸流管的电流平均值和有效值均增加,这限制了回路应用于大脉冲能量场合。

其次,闸流管作为一种气体放电开关,存在着使用寿命问题,通常在 $10^8 \sim 10^9$ 量级^[37],这限制了回路在高重复频率场合的应用。

因此,在高重复频率的激光应用中,例如集成电路光刻,通常采用基于固态开关和多级磁脉冲压缩开关的全固态激励回路^[38-40],原理通常如图7所示:C0在HV的作用下充电储能,固态开关IGBT触发导通后,C0中的能量通过升压变压器Tr以相对缓慢的速度将能量转移至C1;MS1和MS2为可饱和电感,在承受一定的电压保持时间后发生饱和,由大电感状态变化为小电感,因此C1上的能量通过逐级饱和的MS1和MS2逐级转移至C2和C3,并且转移时间逐级减小,实现脉冲时间的压缩;最终C3电压上升至气体放电阈值后,通过回路电感对电极间气体形成放电激励,从而形成激光输出。从C0到最终峰值电容器C3,激励脉冲通常从最初的几个 μ s量级被压缩至满足准分子泵浦需求的小于100 ns^[41]。

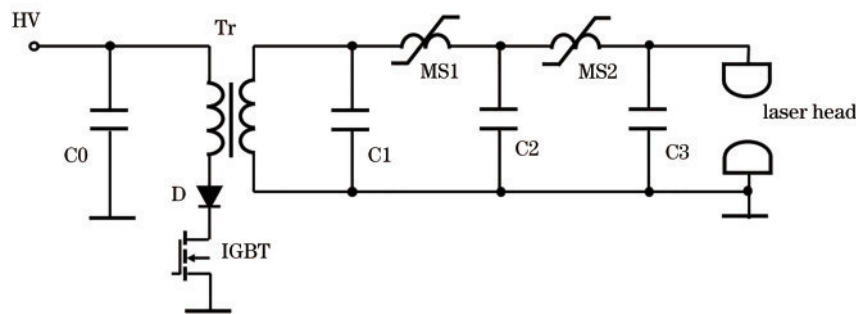


图7 全固态激励回路示意图

Fig. 7 Diagram of all solid state excitation circuit

全固态激励回路基本可做到免维护和无限寿命,是工业用高重复频率、高可靠准分子激光系统的重大进步,目前,所有用于集成电路光刻的高重复频率准分子激光系统都使用全固态激励回路^[41-43]。

这种脉冲电路应用,对磁芯元件提出了较高的性能要求,包括高饱和磁通密度、低损耗、高层间绝缘、低磁致伸缩等^[44-45]。目前,国外仅有为数不多的厂家可以提供该类产品,但对国内禁运,而国内相关行业尚未

完全解决这种关键元件的制备问题。

2.2 气体放电腔

准分子激光器的放电腔通常包含储气筒体、放电电极、预电离、气体循环以及散热等主要部分,是准分子激光中最关键的部分,起到将注入的激励脉冲能量有效泵浦至气体介质中的作用,图8^[34]是气体放电腔的结构示意图。

首先,为了获得高效率均匀分布的脉冲激光输出

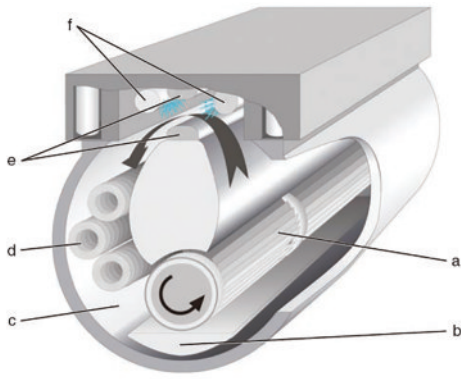


图 8 气体放电腔示意^[34]

Fig. 8 Gas discharge chamber indication^[34]

能量,需要在气体介质中获得大体积均匀的辉光放电,保证放电的稳定性,尽可能避免不利于能量沉积和激光增益形成的电弧放电^[46]。因此,放电腔通常采

用大体积均匀放电电极结合预电离的方式实现,气体介质的激活体积和均匀程度,直接影响激光输出特性。

大体积均匀放电要求截面内放电的宽度和均匀性,同时由于低回路电感、高泵浦速率的需求,要求放电电极尽量紧凑^[47],因此放电电极的截面曲线设计,以及形成的放电电场分布,是其中的关键。通常希望电场强度在放电区域内分布均匀,但在边缘处急剧降低,从而起到最大化能量提取、限制放电区域、维持放电稳定的作用^[48]。常用的电极截面曲线主要有基于保角变换理论的张氏面型、紧凑型张氏面型^[49]、Ernst 面型^[50],以及基于泊松方程一般解析式的 Stappaerts 面型^[48]等。实际应用中,需要结合预电离等其他携带高压的部件共同考虑,分析电场分布,并对理论计算的电极曲线针对加工工艺进行优化,才能获得电极间的均匀放电(图 9)^[51]。

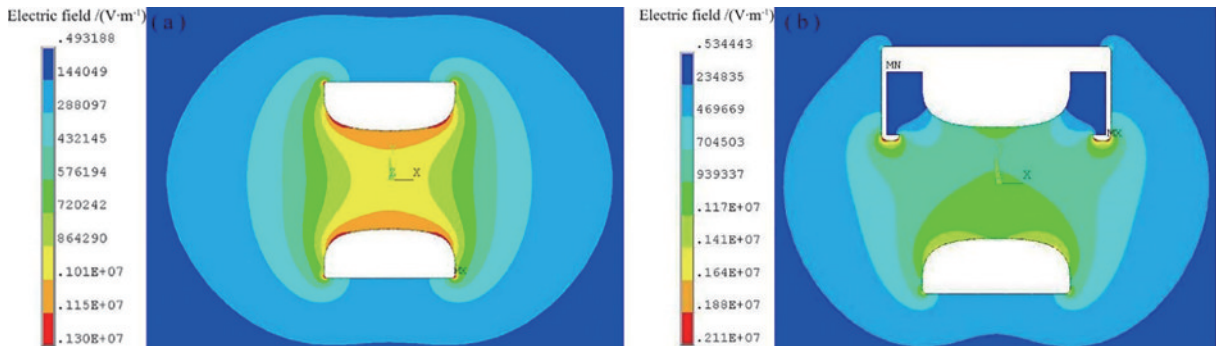


图 9 同样电极结构的不同电场云图^[51]。(a) 紧凑型张氏面型电极;(b) 带有预电离板的紧凑型张氏面型电极

Fig. 9 Different electric field cloud images of the same electrode structure^[51]. (a) Compact Chang's surface electrode; (b) compact Chang's surface electrode with preionization plate

大体积高压腔体放电时,即使是均匀设计的电极间仍然极易出现分布电弧放电,直接影响激光输出质量,因此需要采用预电离技术^[52],使得主放电开始前气体介质中预先含有一定的自由电子分布,均匀分布的电子在主电场的作用下加速碰撞气体分子,发生雪崩击穿,能明显抑制电弧放电,通常需要 $10^7 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$

的电子密度,从而使得主放电足够均匀^[4,53]。预电离与主放电的时间间隔与气体组分和腔内气压有关,通常在几十纳秒量级^[54]。目前放电激励准分子激光设备中通常采用的技术为适合于较低脉冲能量、高重复频率的电晕预电离^[55],以及适合于大脉冲能量相对低重复率的火花预电离^[56]和表面爬电预电离^[57],如图 10 所示。

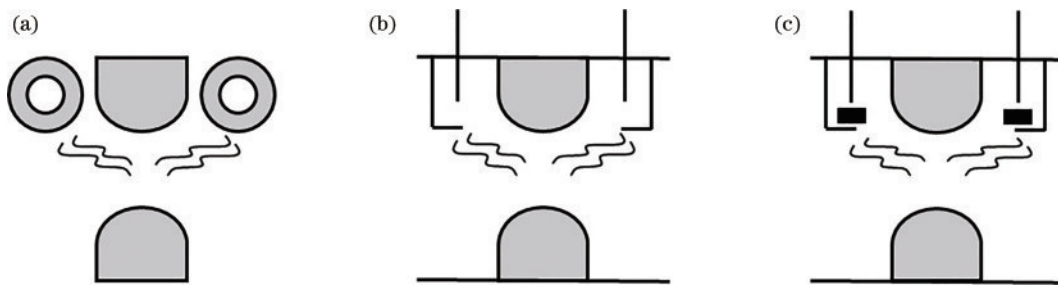


图 10 常用的预电离结构示意图。(a) 电晕预电离^[55];(b) 火花预电离^[56];(c) 表面爬电预电离^[57]

Fig. 10 Commonly used preionization structure indication. (a) Corona preionization^[55]; (b) bare spark pre-ionization^[56]; (c) surface creepage preionization^[57]

放电腔设计的第二个要点在于解决绝缘强度、机械强度以及良好的耐腐蚀性等实际工程问题。准分子

激光的气体介质压强通常 $0.3 \sim 0.6 \text{ MPa}$,其中含有 $0.05\% \sim 0.50\%$ 的强腐蚀性卤素气体,同时需要绝缘

放电电极间 20~40 kV 的电压,这对结构件的选择、设计和加工都提出了苛刻的要求。

国外的准分子激光器早在 20 世纪 90 年代就开始采用金属陶瓷腔结构,大大提高有效激光使用时间^[58]。国内由于基础材料、加工技术等限制,直到 2010 年后才解决大型陶瓷绝缘支撑件的加工制备,实现和国外实用器件的性能接近。

第三,放电腔内还需要实现高速的气体循环。放电电极间的快脉冲放电,会导致放电区气体受热膨胀

不再均匀,且电极会随着放电发生溅射,生成杂质,影响下一个脉冲的正常均匀放电^[4]。因此放电区的气体需要在脉冲间隔时完全更新,这就要求电极间实现足够气体流速,通常为 25~50 m/s,但对于高重复频率或者大平均功率的准分子激光来说,可能需要达到 50~100 m/s 的流速才足以支持激光的持续稳定输出^[59],这对放电腔内的气体流场设计、电极间的流速分布和稳定等提出了较高的要求,目前已可以基于各种数值仿真软件进行设计和优化(图 11)^[60]。

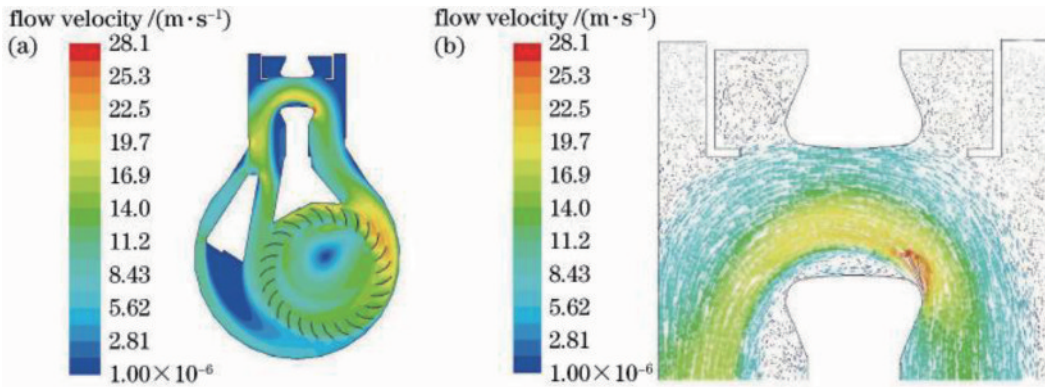


图 11 放电腔内的流场仿真^[60]。(a)腔内气体速度云图;(b)电极间的气体流速矢量图

Fig. 11 Flow field simulation in discharge chamber^[60]. (a) Cloud map of velocity of gas inside chamber; (b) vector graph of gas flow velocity between electrodes

2.3 光学谐振腔

放电泵浦准分子激光的典型谐振腔结构为平行平面腔,通常反射窗采用多层介质膜来获得高反射率。由于准分子激光介质的高增益,通常放电腔较长的激光系统中,输出镜无需镀膜,利用输出镜的镜面反射即可实现激光脉冲的正常振荡输出,而对于放电腔长较小的小型激光器,根据输出脉冲能量的需求,输出窗的反射率通常 20%~50%^[34]。光束在谐振腔中只能进行有限次往返振荡,导致典型的准分子激光为多模光束,具有大的光束横截面和光束发散角。图 12 是一台中国科学院安徽光学精密机械研究所制造的准分子激光

器的典型输出光束分布,工作波长为 248 nm(KrF),脉冲能量为 0.6 J,光斑截面约为 25 mm×7 mm,光束发散角约为 3 mrad×1 mrad。

在放电泵浦准分子激光的某些应用中,例如大气探测^[61]、FBG 刻写^[62]等,对光束的发散特性有所限制,要求准分子激光光束发散角尽量小,通常可以采用正支非稳定谐振腔的结构来改善^[63],但其标准模式具有环状的输出光斑^[64],对于近场应用并不理想(图 13^[4])。目前较实用的结构为输出镜部分透射的混合型非稳腔,能保持非稳腔输出方向性好的优点,又具有稳定腔非环状输出有良好均匀的近场光斑的特点^[65]。

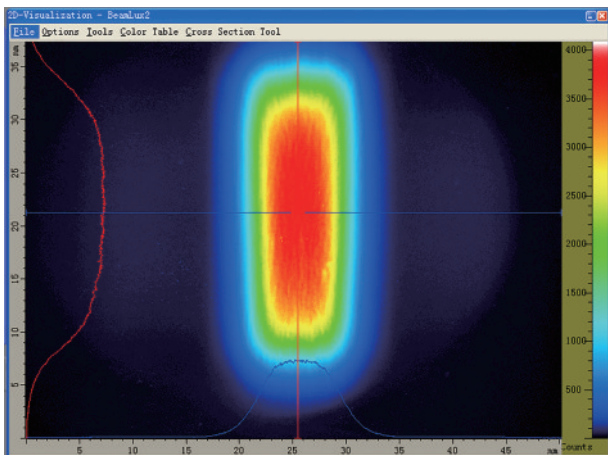


图 12 典型准分子激光光束分布

Fig. 12 Typical excimer laser beam distribution

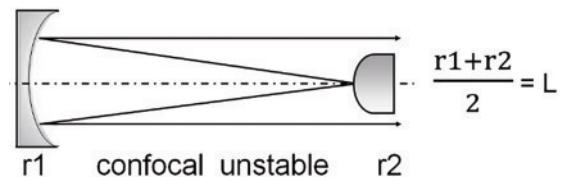


图 13 标准模式的正支非稳腔^[4]

Fig. 13 Positively supported unstable cavity in standard mode^[4]

3 主要应用进展及其中的关键技术

3.1 工业领域

3.1.1 集成电路光刻

自 20 世纪 90 年代起,放电激励的 248 nm KrF 准分子激光开始被应用为集成电路光刻光源^[66],随后是进一步缩短波长的 193 nm^[67]。2000 年后浸没式和多重

曝光技术等不断延续 193 nm 光源的生命力^[68-69], 促进集成电路特征尺寸不断降低至 20 nm 左右^[70-71]。

虽然近些年最先进的光刻系统已采用极紫外 (EUV) 光源^[72], 但基于 193 nm 准分子激光系统的光源仍然占据光刻系统主流地位^[73]。近几年的市场数据显示, 全球光刻市场中, 基于准分子激光的 DUV 光刻机占销售总量的约 60%, DUV 光源是当前半导体集成电路制造的主力。

目前光刻用准分子激光光源基本被荷兰 ASML 公司 (收购美国 Cymer 公司) 和日本的 Gigaphoton 公司所垄断, 提供的最高级别光刻用准分子激光产品平均输出功率在百瓦级别, 典型的重复频率在 6 kHz^[74]。TWINSKAN NXT:2050i 是荷兰 ASML 公司最先进的采用浸没技术的 DUV 光刻系统, 并被用于 5 nm 逻辑和第四代 10 nm DRAM 节点的大批量生产, 图 14^[75] 是荷兰 ASML 公司的 DUV 光刻系统。

集成电路光刻用准分子激光光源具有一些苛刻的技术指标要求^[76], 因此除了前面所述的关键技术外, 在激光系统结构、控制方法以及光学谐振腔等方面, 产生了一些特殊的关键技术, 最典型的是线宽压窄技术和双腔同步放大技术。

光刻系统中, 激光光源需要配合光学系统、掩模实现高精度投影光刻, 通常要求 193 nm 的准分子激光谱线半峰全宽 (FWHM) 小于 0.2 pm, 这与脉冲能量呈相互制约的关系^[77], 单腔结构的准分子激光无法同时满足两种参数需求。目前 DUV 光刻大多采用基于双放电腔结构的主振荡功率放大 (MOPA) 或其改进型系统, 由一台放电腔产生线宽极窄的低脉冲能量种子光, 由另一台放电腔对其进行放大, 最终实现所需的激光



图 14 荷兰 ASML 公司 TWINSKAN NXT:2050i^[75]
Fig. 14 TWINSKAN NXT:2050i, ASML, Netherlands^[75]
参数^[76-78]。

种子腔 (MO) 主要负责产生谱线宽度极窄的种子光, 目前通常采用多棱镜扩束加大尺寸光栅组合的结构, 实现种子光线宽由自由振荡时约 0.5 nm 压窄至光刻实用的小于 0.2 pm 量级^[79-80]。功率放大腔 (PA) 主要负责对种子光进行脉冲能量放大, 由于种子光必须在放大腔粒子数反转期间通过其放电区域, 且准分子激光的上能级寿命极短, 在 10^{-8} s 量级, 所以需要实现两腔放电时间高精度同步。目前的 DUV 光源系统中, 由于具体的机械和光路结构, 通常需要种子腔先于功率放大腔约几十 ns 放电, 并维持放电时序抖动在 ± 5 ns 内, 才能实现高效、稳定的窄线宽、大脉冲能量准分子激光输出^[81-82]。图 15 是典型的 DUV 光刻用双放电腔 MOPA 结构示意图。

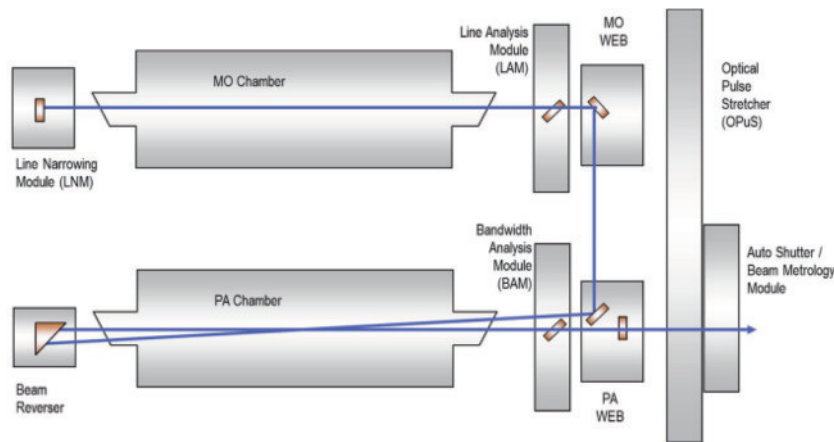


图 15 MOPA 结构准分子激光系统示意图^[76]
Fig. 15 Diagram of MOPA excimer laser system^[76]

3.1.2 显示行业

显示行业近年来新兴了一些准分子激光系统的关键应用, 特点均为要求较大的脉冲能量和重复频率, 利用材料对紫外波长激光的吸收发生改性, 从而实现产品性能提升。

首先, 大功率准分子激光退火是目前高端显示技术 LTPS TFT-LCD/AMOLED (低温多晶硅薄膜晶体管液晶/主动矩阵有机发光二极管显示) 的标准加工工艺, 其原理是利用非晶硅对波长 308 nm 的准分子激光高效吸收, 发生改性, 由电子迁移率低于 $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的

非晶硅状态转变成电子迁移率 $100\sim 400\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的多晶硅薄膜,从而制备高品质、高响应速度的 TFT 器件,大大提升平板显示器的分辨率、亮度和显示效果^[83-84]。

其次在柔性显示领域,基于 248 nm 准分子激光的激光剥离(LLO)技术将深紫外准分子激光光束整形后透过玻璃基板载体,照射在聚合物层上,由于聚合物层材料对 248 nm 深紫外激光的吸收率很高,只有紧邻玻璃基板的聚合物被蒸发,从而实现基板与器件的分离^[85-86]。

近年来, Micro LED 因其功耗低、响应快、寿命长、光效率高特点,被视为继 LCD、OLED 之后的新一代显示面板技术,但目前生产工艺中的巨量转移技术仍然是限制其产业化的关键^[87-88]。基于类似 LLO 原理的深紫外准分子激光巨量转移技术,如 LIFT、p-LLO 等,由于非接触、转移距离小、精度高,可适用于各种 PCB 尺寸等优点,被认为在目前在研的多种技术方案中极具优势,是最有希望的巨量转移方案^[89-91]。

以上这些应用中,作为关键部件的大功率准分子激光系统,基本均为从美国的 Coherent 公司购买,实现了全球垄断。目前 Coherent 公司在显示行业应用的大功率准分子激光系统有 2.4 kW、1.2 kW^[92]等多种参数,其技术方案是通过将单腔 600 W (1 J、600 Hz) 的多台套激光光束同步合束实现^[93],在多台套激光的高精度时间同步、多光束合束光学系统设计等方面具有独特的关键技术,如图 16、17 所示。

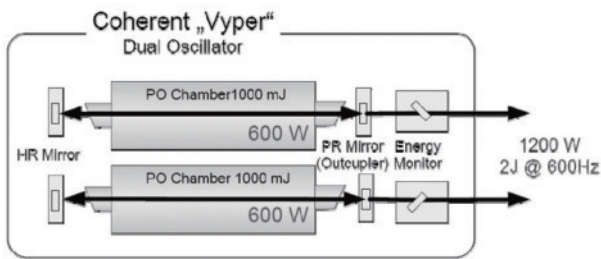


图 16 Coherent 公司两腔同步合束技术方案^[93]

Fig. 16 Coherent's two-cavity synchronous combination technology scheme^[93]

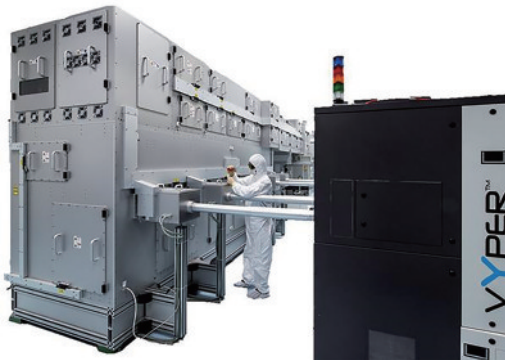


图 17 多腔联用的平板退火应用场景^[92]

Fig. 17 Application of multi-cavity plate annealing^[92]

3.2 医疗领域

准分子激光的光子能量大、热作用小,可以有效地切断组织内化学链,影响组织范围小,因此在医疗领域具有一些独特的应用。

眼科行业自 20 世纪 90 年代起就广泛采用 193 nm 的 ArF 准分子激光进行 PRK (Photo Refractive Keratectomy)、PTK (Photo Therapeutic Keratectomy) 和 LASIK (Laser *in Situ* Keratomileusis) 等手术对近视、散光、远视进行矫正^[94]。随着飞秒激光的发展,眼科屈光矫正用激光系统目前处于准分子激光和飞秒激光共存的状态^[95]。

皮肤行业自 2000 年左右开始采用 308 nm 准分子激光治疗白癜风、银屑病等皮肤疾病^[96-98],以其显效快速、治疗次数少、累计剂量低、不累及正常皮肤、副作用少、缓解期相对长等特点在临床上得到广泛应用^[99],国内也开展了相关研究工作^[32,100]。

基于 308 nm 准分子激光的冠状动脉斑块消融术(ELCA),是近几年新兴的介入式激光治疗手段。其诞生于 20 世纪 80 年代^[101],但因早期激光技术不够先进、并发症较多,以及药物洗脱支架的出现,限制了实际应用,多集中于科学研究^[102-103]。近些年,随着准分子激光技术和导管技术的进步,国外开始逐步将 ELCA 应用在下肢动脉粥样硬化闭塞症、急性动脉血栓、支架内再狭窄,以及心脏起搏电极拔除等高难度病变中^[104-106]。目前,这种类型的高端激光医疗设备仅有美国 Spectranetics 一家(2017 年被 Philips 收购)^[107],垄断了整个应用市场,且于 2016 年下半年取得了中国的 CFDA 认证,开始进入中国市场应用于临床治疗^[108-110]。

在这种应用中,与其他医疗应用所不同的在于,由于需要使用极细的光纤导管介入血管内,通常采用多束小直径($50\sim 100\ \mu\text{m}$)的固体 UV 光纤集束至 $1\sim 2\ \text{mm}$ 进行激光脉冲传输,光纤的使用寿命及传输效率受传输激光的功率密度的影响^[111-112]。典型放电结构的准分子激光脉宽仅有 $20\sim 30\ \text{ns}$,峰值功率达到 $10^7\ \text{W}$ 量级,聚焦至多束光纤后功率密度达到 $10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 量级,接近石英光纤的损伤阈值^[113],会在数个激光脉冲内形成光纤的端面或纤芯损坏,造成传输率的迅速下降,无法满足医疗应用的正常进行。因此,这种介入医疗应用激光系统在脉宽控制、光束耦合等方面提出了不同的关键技术要求,通常采用特殊设计的基于 PFN 的放电泵浦回路,以实现激光的长脉冲运行(图 18)^[114]。

3.3 科研领域

准分子激光作为深紫外波段大脉冲能量、高峰值功率的激光光源,一直被广泛地应用于光谱学、表面科学、材料科学、反应动力学等科学研究中。

脉冲激光沉积(PLD)是一种材料科学研究方法,将脉冲激光器所产生的高功率脉冲激光束聚焦作用于靶材表面,使靶材表面产生高温及熔蚀,并进一步产生

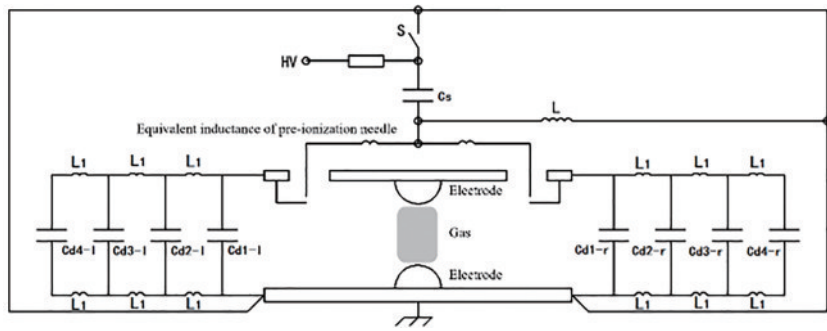


图 18 一种长脉冲泵浦回路^[114]
Fig. 18 A long pulse pump circuit^[114]

高温高压等离子体,这种等离子体定向局域膨胀发射,并在衬底上沉积而形成薄膜,从而进行相关研究^[5]。

1987 年贝尔实验室 Dijkkamp 等^[115]首次尝试用 KrF 准分子激光器成功地制备出高质量的高温超导薄膜。经过这些年的发展,基于 KrF 准分子激光 PLD 方法制备 YBCO 超导带材(图 19^[5]),已成为目前市场上较适合连续化大规模生产,且性价比优越的方案,具有高载流量、高电流均一性和强磁场下性能优越等特点^[116-117]。

激光剥蚀等离子质谱 LA-ICP-MS 是地质样品微量元素分析中的一种重要方法(图 20),基本原理是将激光束聚焦于样品表面使之熔蚀气化,由载气(He 或/和 Ar)将样品微粒(气溶胶)送至等离子体中电离,再经质谱系统进行质量过滤,最后用接收器分别检测不同质荷比的离子,从而进行相关分析^[118]。

早期的激光剥蚀采样技术主要采用红外或可见段激光^[119],随着准分子激光技术的进步,基于 193 nm 波

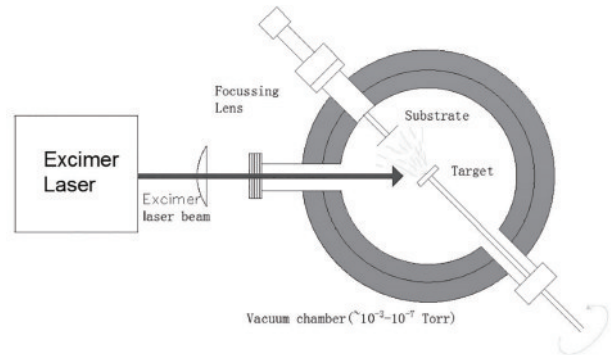


图 19 PLD 原理示意^[5]
Fig. 19 Principle of PLD^[5]

长 ArF 准分子激光的 LA-ICP-MS 在改善能量耦合效率、提高空间分辨率、增强物质吸收率、降低分馏效应、提高分析精度上都获得了极大改进^[120-121],在地质样品分析中获得了广泛的应用。

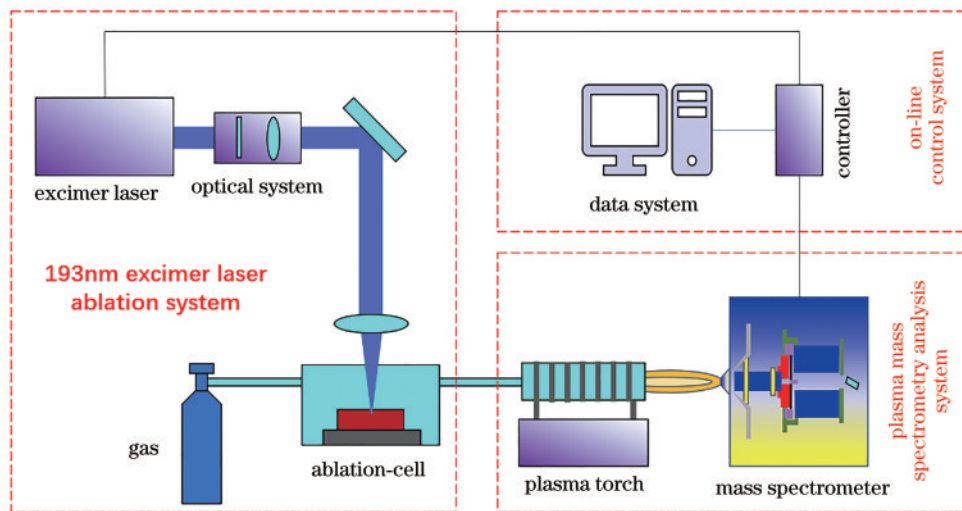


图 20 LA-ICP-MS 系统结构示意图
Fig. 20 LA-ICP-MS system structure diagram

4 结束语

准分子激光是一种有特色的气体激光,自诞生以来,从研究走向应用,已经在工业、医疗、科研等领域发

挥着不可替代的作用。

目前,国内准分子激光相关的各个方面都还存在着一些问题。首先,作为一种已经诞生 50 年的气体激光,国外的产业化已经相当成熟,基本占据目前的各种

应用市场,国内产品存在着替代困难的现实问题;其次,国内的准分子激光行业在关键技术、高端产品等方向和国外仍有一定差距,导致光刻、平板制造等工业领域存在着“卡脖子”的状况,严重制约我国高端制造业的发展;第三,由于气体激光天生的相对体积庞大、操作繁琐等问题,无可避免地存在应用市场不断缩减、从业人员不断减少的情况。

然而,随着国内大循环和国内国际双循环新发展格局的构建,伴随着国家科技重大项目的支持,相信我国的准分子激光必将迸发出新的活力,突破国外技术封锁和产品壁垒,实现国内各领域发展中的支撑作用。

参 考 文 献

- [1] Basting D, Stamm U. The development of excimer laser technology-history and future prospects[J]. Zeitschrift Für Physikalische Chemie, 2001, 215(12): 75-99.
- [2] 楼祺洪. 准分子激光器的发展和应用[J]. 中国激光, 1994, 21(5): 361-364, 440.
Lou Q H. Progress of excimer lasers and its applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, 21(5): 361-364, 440.
- [3] Basov N G, Danilychev V A, Popov Y M, et al. Laser operating in the vacuum region of the spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam[J]. JETP Letters, 1970, 12(10): 329-331.
- [4] Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology[M]. New York: Springer, 2005.
- [5] 余吟山, 游利兵, 梁勳, 等. 准分子激光技术发展(邀请论文)[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
Yu Y S, You L B, Liang X, et al. Progress of excimer lasers technology(invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.
- [6] 刘晶儒, 赵学庆. 高功率准分子激光技术及其应用[J]. 现代应用物理, 2019, 10(4): 3-17.
Liu J R, Zhao X Q. High power excimer laser technology and its applications[J]. Modern Applied Physics, 2019, 10(4): 3-17.
- [7] Turner T P, Jones J E, Czuchlewski S J, et al. Configuration and performance of the Los Alamos Aurora KrF/ICF laser system[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1225: 23-33.
- [8] Divall E J, Edwards C B, Hirst G J, et al. Titania-a 1020 W cm⁻² ultraviolet laser[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(5): 1025-1033.
- [9] Owadano Y, Okuda I, Matsumoto Y, et al. Overview of 'Super-ASHURA' KrF laser program[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 44(1/2/3/4): 91-96.
- [10] Obenschain S P, Bodner S E, Colombant D, et al. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments[J]. Physics of Plasmas, 1996, 3(5): 2098-2107.
- [11] Zvorykin V D, Lebo I G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN[J]. Laser and Particle Beams, 1999, 17(1): 69-88.
- [12] 向益淮, 单玉生, 龚堃, 等. 高功率 KrF 准分子激光光束平滑技术实验研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(2): 101-105.
Xiang Y H, Shan Y S, Gong K, et al. Experimental investigations of beam smooth technique for high power KrF laser system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(2): 101-105.
- [13] 马维义, 胡凤明, 马景龙, 等. 天光一号预放大器实验条件的优化[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 120-122.
Ma W Y, Hu F M, Ma J L, et al. Optimization of experimental conditions for Heaven 1 pre-amplifier[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2001, 13(1): 120-122.
- [14] 张春斌, 龙滔. 天光一号预放大器中的放大自发辐射效应[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 651-654.
Zhang C B, Long T. Effect of amplified spontaneous emission in Heaven-I pre-amplifier[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2002, 14(5): 651-654.
- [15] 于力, 刘晶儒, 易爱平, 等. 光泵浦 XeF(C-A)激光技术研究进展[J]. 中国工程科学, 2009, 11(9): 38-43.
Yu L, Liu J R, Yi A P, et al. Development of optically pumped XeF(C-A) laser[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(9): 38-43.
- [16] 于力, 马连英, 易爱平, 等. 重频 XeF 蓝绿激光技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1839-1842.
Yu L, Ma L Y, Yi A P, et al. Technology of XeF blue-green laser with repetitive rate[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1839-1842.
- [17] 沈炎龙, 朱峰, 于力, 等. 高功率 1 nm 窄线宽重频 XeF(C-A)蓝光激光器[C]//第十四届全国物理力学学术会议文集. 北京: 中国力学学会, 2016: 216.
Shen Y L, Zhu F, Yu L, et al. High power 1 nm narrow line width repeat frequency XeF(C-A) Blue laser[C]// Proceedings of Fourteenth National Conference on Physical Mechanics. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2016: 216.
- [18] Shan Y S, Wang N Y, Ma J L, et al. A six-beam high-power KrF excimer laser system with energy of 100 J/23 ns[J]. Laser and Particle Beams, 2002, 20(1): 123-127.
- [19] Zhao X Q, Liu J R, Yi A P, et al. Progress on high power excimer laser in NINT[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 925523.
- [20] 楼祺洪, 徐捷, 傅淑芬, 等. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Lou Q H, Xu J, Fu S F, et al. Pulsed discharge gas laser [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [21] 余吟山, 方晓东, 李会, 等. 放电激励的 100 W XeCl 准分子激光器[J]. 量子电子学, 1996, 13(4): 329-331.
Yu Y S, Fang X D, Li H, et al. Discharge-pumped 100 W XeCl excimer laser[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1996, 13(4): 329-331.
- [22] 楼祺洪. 脉冲放电时间对 XeCl 准分子激光输出的影响[J]. 激光杂志, 1986, 7(4): 195-199.
Lou Q H. The effects of pulse discharge duration on the output of XeCl excimer laser[J]. Laser Journal, 1986, 7(4): 195-199.
- [23] 王长山, 南英子, 吴海林, 等. XeCl 准分子激光泵浦的

- 无腔染料激光器和紫外-可见波段调谐染料激光器[J]. 激光杂志, 1987, 8(1): 55-58.
- Wang C S, Nan Y Z, Wu H L, et al. Dye laser without cavity pumped by a XeCl excimer laser and tunable dye laser at ultraviolet-visible range[J]. Laser Journal, 1987, 8(1): 55-58.
- [24] 王又青, 郭振华, 李再光. 准分子激光器脉冲磁压缩开关的设计分析[J]. 激光技术, 1996, 20(1): 9-13.
- Wang Y Q, Guo Z H, Li Z G. Design of magnetic switch for excimer laser[J]. Laser Technology, 1996, 20(1): 9-13.
- [25] Elliott D J, Senguta U K. Excimer lasers for deep UV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1377: 6-17.
- [26] Sandstrom R L. Measurements of beam characteristics relevant to DUV microlithography on a KrF excimer laser [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1264: 505-519.
- [27] Lokai P, Rebhan U, Oesterlin P, et al. High-repetition-rate KrF lithography excimer laser with narrow bandwidth below 2 pm[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1264: 496-504.
- [28] Wassenaar Arrangement Secretariat. List of dual-use goods and technologies and munitions list[EB/OL]. (2021-12-23)[2022-05-02]. <https://www.wassenaar.org/control-lists/>.
- [29] Bureau of Industry and Security. Commerce Control List (CCL)[EB/OL]. (2022-04-11)[2022-05-02]. <http://initia.adamstankandlift.com/charm-https-www.bis.doc.gov/index.php/regulations/commerce-control-list-ccl>.
- [30] 梁勳, 游利兵, 王涛, 等. 实时调节工作电压实现稳定准分子脉冲能量[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 374-378.
- Liang X, You L B, Wang T, et al. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage realtime adjusting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 374-378.
- [31] 王效顺, 余吟山, 王庆胜, 等. 高效率放电抽运 KrF 准分子激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0102001.
- Wang X S, Yu Y S, Wang Q S, et al. A discharge-pumped KrF excimer laser with high efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0102001.
- [32] 刘毅, 方晓东, 梁勳, 等. 用于白癜风治疗的 308 nm XeCl 准分子激光系统[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602002.
- Liu Y, Fang X D, Liang X, et al. 308 nm XeCl excimer laser system used for treatment of vitiligo[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0602002.
- [33] 梁勳. 深紫外准分子激光器系列产品: ExciMAS-P20/P200/B200[EB/OL]. (2021-04-20)[2022-05-02]. http://www.bulletin.cas.cn/publish_article/2021/Z1/2021Z1117.htm.
- Liang X. Deep-UV excimer lasers products: ExciMAS-P20/P200/B200[EB/OL]. (2021-04-20) [2022-05-02]. http://www.bulletin.cas.cn/publish_article/2021/Z1/2021Z1117.htm.
- [34] Injeyan H, Goodno G D. High Power Laser Handbook [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2011.
- [35] 梁勳, 赵读亮, 林颖, 等. 基于可控 LC 串联谐振的高重频高精度脉冲充电电源[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 3022-3027.
- Liang X, Zhao D L, Lin Y, et al. High repetition rate and high accuracy capacitor charging pulse power supply based on controllable LC series resonance[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 3022-3027.
- [36] 马英岚, 梁勳, 赵读亮, 等. 放电准分子激光电磁干扰环境下控制系统设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 210-212.
- Ma Y L, Liang X, Zhao D L, et al. Design of control system in electromagnetic interference environment of discharge excimer laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 210-212.
- [37] Fisher C H, Smilanski I, Petr R A, et al. Magnetic switching techniques for fast discharge lasers[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics, May 17-20, 1983, Baltimore, Maryland. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 1983: FE4.
- [38] Shimada T, Obara M, Noguchi A. An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers[J]. Review of Scientific Instruments, 1985, 56(11): 2018-2020.
- [39] Delmdahl R F, Nikolaus B. Solid state pulsed high-repetition-rate excimer lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5339: 284-291.
- [40] Ness R, Melcher P C, Smith B, et al. Performance characterization for an excimer laser solid-state pulsed power module (SSPPM) after 20B shots[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(5): 1324-1328.
- [41] Ness R, Melcher P, Ferguson G, et al. A decade of solid state pulsed power development at Cymer Inc[C]// Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium, 2004 and 2004 High-Voltage Workshop, May 23-26, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 228-233.
- [42] Rokitski R, Fleurov V, Bergstedt R, et al. Enabling high volume manufacturing of double patterning immersion lithography with the XLR 600ix ArF light source[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72743O.
- [43] Tsushima H, Yoshino M, Ohta T, et al. Reliability report of high power injection lock laser light source for double exposure and double patterning ArF immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72743L.
- [44] Smith C H. Magnetic pulse compression by metallic glasses[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 6032-6034.
- [45] Bolotin I, Mamaev G, Mamaev S, et al. Influence of the technological process conditions to parameters of magnetic cores from ribbon amorphous alloys[C]// Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 99CH36366), March 27-April 2, 1999, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 1999: 1482-1484.
- [46] 刘晶儒, 易爱平, 胡志云, 等. 准分子激光技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- Liu J R, Yi A P, Hu Z Y, et al. Excimer laser

- technology and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [47] Hermsen T. Note on the design of electrode profiles for discharge lasers[J]. Optics Communications, 1987, 64(1): 59-62.
- [48] Stappaerts E A. A novel analytical design method for discharge laser electrode profiles[J]. Applied Physics Letters, 1982, 40(12): 1018-1019.
- [49] Chang T Y. Improved uniform- field electrode profiles for TEA laser and high- voltage application[J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44(4): 405-407.
- [50] Ernst G J. Uniform-field electrodes with minimum width [J]. Optics Communications, 1984, 49(4): 275-277.
- [51] 朱能伟, 方晓东, 梁勛, 等. 准分子激光器中张氏面型电极的电场仿真研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 680-683.
- Zhu N W, Fang X D, Liang X, et al. Simulation study on electric field of Chang electrodes in excimer lasers[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 680-683.
- [52] Turner M M. Relations between preionization density distribution, electrode design, and efficiency in high-pressure discharge-excited gas lasers[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(21): 2866-2868.
- [53] Levatter J I, Lin S C. Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(1): 210-222.
- [54] Burnham R, Djeu N. Ultraviolet-preionized discharge-pumped lasers in XeF, KrF, and ArF[J]. Applied Physics Letters, 1976, 29(11): 707-709.
- [55] Fieret J. Aerodynamic aspects of a corona-preionized high-repetition-frequency excimer laser[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1225: 122-130.
- [56] Miyazaki K, Hasama T, Yamada K, et al. Efficiency of a capacitor-transfer-type discharge excimer laser with automatic preionization[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(8): 2721-2728.
- [57] Sanz F E, Perez J M G. Peaking capacitor in an incomplete corona surface discharge preionized TEA CO₂ laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(4): 891-894.
- [58] Saito T, Ito S, Tada A. Long lifetime operation of an ArF-excimer laser[J]. Applied Physics B, 1996, 63(3): 229-235.
- [59] von Bergmann H M, Bredenkamp G L, Swart P H. High repetition rate high power excimer lasers[J]. Proceedings of SPIE, 1989, 1023: 20-24.[LinkOut]
- [60] 朱能伟, 方晓东. 基于 FLUENT 的准分子激光器气体流场数值仿真[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901007.
- Zhu N W, Fang X D. FLUENT-based numerical simulation of gas flow field of excimer laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901007.
- [61] Veselovskii I, Barchunov B. Excimer-laser-based lidar for tropospheric ozone monitoring[J]. Applied Physics B, 1999, 68(6): 1131-1137.
- [62] Delmdahl R. High-spatial coherence excimer laser for the production of fiber Bragg gratings[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6106: 61060C.
- [63] McKee T J, Boyd G T. Performance comparison of positive branch unstable resonator cavities for excimer lasers[J]. Applied Optics, 1988, 27(9): 1840-1843.
- [64] 赵震声, 胡雪金, 沈德立, 等. 非稳腔运转的准分子激光器[J]. 量子电子学, 1989, 6(1): 27-28, 40.
- Zhao Z S, Hu X J, Shen D L, et al. An excimer laser operating on unstable resonator[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1989, 6(1): 27-28, 40.
- [65] 楼祺洪. 用混合型非稳腔改善准分子激光的输出特性[J]. 应用激光, 1984, 4(4): 158-160.
- Lou Q H. Improvement of excimer laser output characteristics by using a hybrid unstable resonator[J]. Applied Laser, 1984, 4(4): 158-160.
- [66] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(09): 0922006.
- Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and Updates of Advanced Photolithography Technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(09): 0922006.
- [67] Duffey T P, Embree T J, Ishihara T, et al. ArF lasers for production of semiconductor devices with CD<0.15 μm[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3334: 1014-1020.
- [68] Rokitski R, Ishihara T, Rao R, et al. High reliability ArF light source for double patterning immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401Q.
- [69] Yoshino M, Nakarai H, Ohta T, et al. High-power and high-energy stability injection lock laser light source for double exposure or double patterning ArF immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69242S.
- [70] Miao X Q, Huli L, Chen H, et al. Double patterning combined with shrink technique to extend ArF lithography for contact holes to 22 nm node and beyond [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69240A.
- [71] Cacouris T, Conley W, Thomes J, et al. New ArF immersion light source introduces technologies for high-volume 14 nm manufacturing and beyond[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9426: 942618.
- [72] Pirati A, Peeters R, Smith D, et al. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook[C]// 2017 IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM), February 28-March 2, 2017, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 77-79.
- [73] Cacouris T, Rechtsteiner G, Conley W. Next-generation DUV light source technologies for 10nm and below[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 1014718.
- [74] 范元媛, 周翊, 郭馨, 等. 我国准分子激光技术发展现状及趋势研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 29-34.
- Fan Y Y, Zhou Y, Guo X, et al. Development status and trend of China's excimer laser technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 29-34.
- [75] ASML. ASML annual report 2021[EB/OL]. (2022-02-09)[2022-05-02]. <https://www.asml.com/en/investors/annual-report>.
- [76] Roman Y, Kanawade D, Gillespie W, et al. Advances in

- DUV light source sustainability[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 101471Y.
- [77] Fleurov V B, Brown D J W, et al. Dual-chamber ultra line-narrowed excimer light source for 193-nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 1694-1703.
- [78] Wakabayashi O, Ariga T, Kumazaki T, et al. Beam quality of a new-type MOPO laser system for VUV laser lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5377: 1772-1780.
- [79] 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.
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.
- [80] 楼祺洪, 袁志军, 张海波. 光刻技术的历史与现状[J]. 科学, 2017, 69(3): 32-36.
Lou Q H, Yuan Z J, Zhang H B. History and present situation of lithography technology[J]. Science, 2017, 69(3): 32-36.
- [81] Ershov A I, Ness R M. Timing control for two-chamber gas discharge laser system: US6865210[P/OL]. 2005-03-08. <https://patents.google.com/patent/US6865210>.
- [82] 王晨, 梁勳, 林颖, 等. MOPA 结构准分子激光同步触发设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20200516.
Wang C, Liang X, Lin Y, et al. Synchronization trigger design of MOPA structure excimer laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20200516.
- [83] Paetzel R, Herbst L, Simon F. Laser annealing of LTSP[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6106: 61060A.
- [84] Masters A, Geuking T. Beam-shaping optics expand excimer-laser applications[J]. Laser Focus, 2005, 41(6): 99-103.
- [85] Hsieh K L, Cheng K N, Wang P F, et al. P-50: application of high temperature debonding layer in the fabrication of flexible AMOLED displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 1324-1327.
- [86] 黄御, 梁勳, 朱能伟, 等. 应用于柔性电子领域的激光剥离技术进展[J]. 激光技术, 2018, 42(4): 440-445.
Huang Y, Liang X, Zhu N W, et al. Development of laser lift-off technology used in the field of flexible electronics[J]. Laser Technology, 2018, 42(4): 440-445.
- [87] Chaji R, Fathi E, Zamani A. Essentials of micro LED display production[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 51(1): 323-327.
- [88] Chen Z, Yan S K, Danesh C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(12): 123001.
- [89] Wagner U, Liebers R, Gebhardt M. Laser technologies for the production of microLEDs for next-generation displays[J]. Proceedings of SPIE, 2022, PC12024: PC1202404.
- [90] Marinov V R. 52-4: laser-enabled extremely-high rate technology for μ LED assembly[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 692-695.
- [91] Zhang B, Haupt O. 55.4: MicroLED-high throughput laser based mass transfer technology[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52(S2): 664-667.
- [92] Coherent. Product catalog of coherent[EB/OL]. (2022-03-21)[2022-05-02]. <https://www.coherent.com/lasers/excimer>.
- [93] Herbst L, Delmdahl R F, Paetzel R. Average power scaling of UV excimer lasers drives flat panel display and lidar applications[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8238: 82380A.
- [94] Heitzmann J, Binder P S, Kassar B S, et al. The correction of high myopia using the excimer laser[J]. Archives of Ophthalmology, 1993, 111(12): 1627-1634.
- [95] Sugar A. Ultrafast (femtosecond) laser refractive surgery[J]. Current Opinion in Ophthalmology, 2002, 13(4): 246-249.
- [96] Hadi S M, Spencer J M, Leibold M. The use of the 308-nm excimer laser for the treatment of vitiligo[J]. Dermatologic Surgery, 2004, 30(7): 983-986.
- [97] Asawanonda P, Anderson R R, Chang Y, et al. 308-nm excimer laser for the treatment of psoriasis: a dose-response study[J]. Archives of Dermatology, 2000, 136(5): 619-624.
- [98] Passeron T, Ortonne J P. Use of the 308-nm excimer laser for psoriasis and vitiligo[J]. Clinics in Dermatology, 2006, 24(1): 33-42.
- [99] 肖佳, 郭爱元, 曾庆海, 等. 308 nm 准分子激光治疗白癜风进展[J]. 激光生物学报, 2016, 25(1): 13-20.
Xiao J, Guo A Y, Zeng Q H, et al. Advances of 308 nm excimer laser in the treatment of vitiligo[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2016, 25(1): 13-20.
- [100] 赵越亮, 李文洁, 梁勳, 等. 准分子激光皮肤治疗仪能量稳定性研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1206001.
Zhao D L, Li W J, Liang X, et al. Study on energy stability for excimer laser skin therapeutic apparatus[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1206001.
- [101] Taylor R S, Singleton D L, Paraskevopoulos G. Effect of optical pulse duration on the XeCl laser ablation of polymers and biological tissue[J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(25): 1779-1781.
- [102] Appelman Y E A, Piek J J, David G K, et al. Randomised trial of excimer laser angioplasty versus balloon angioplasty for treatment of obstructive coronary artery disease[J]. The Lancet, 1996, 347(8994): 79-84.
- [103] 谷怀民, 张虎, 胡雪金, 等. XeCl 准分子激光消融几种生物组织的实验结果[J]. 激光生物学报, 1998, 7(3): 195-197.
Gu H M, Zhang H, Hu X J, et al. The experimental results on the ablation of various biological tissues using a XeCl excimer laser[J]. Acta Laser Biology Sinica, 1998, 7(3): 195-197.
- [104] Bilodeau L, Fretz E B, Taeymans Y, et al. Novel use of a high-energy excimer laser catheter for calcified and complex coronary artery lesions[J]. Catheterization and Cardiovascular Interventions, 2004, 62(2): 155-161.

- [105] Bordachar P, Defaye P, Peyrouse E, et al. Extraction of old pacemaker or cardioverter-defibrillator leads by laser sheath versus femoral approach[J]. *Circulation. Arrhythmia and Electrophysiology*, 2010, 3(4): 319-323.
- [106] Ambrosini V, Sorropago G, Laurenzano E, et al. Early outcome of high energy Laser (Excimer) facilitated coronary angioplasty ON hARD and complex calcified and balloOn-resistant coronary lesions: LEONARDO Study[J]. *Cardiovascular Revascularization Medicine*, 2015, 16(3): 141-146.
- [107] Philips. Philips completes acquisition of the spectranetics corporation[EB/OL]. (2017-08-09)[2022-05-02]. <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/standard/news/press/2017/20170809-philips-completes-acquisition-of-the-spectranetics-corporation.html>.
- [108] 刘巍, 周玉杰, 赵迎新, 等. 经桡动脉入径行准分子激光冠状动脉斑块消融术在冠状动脉钙化病变及慢性完全闭塞病变中的应用: 中国最初应用经验分享[J]. *中国介入心脏病学杂志*, 2016, 24(9): 511-514.
Liu W, Zhou Y J, Zhao Y X, et al. Treatment of complex coronary lesions by excimer laser coronary atherectomy: the initial experiences in China[J]. *Chinese Journal of Interventional Cardiology*, 2016, 24(9): 511-514.
- [109] 于一, 赵迎新, 史冬梅, 等. 准分子激光在经桡动脉复杂冠状动脉病变介入治疗中的应用[J]. *中国介入心脏病学杂志*, 2016, 24(10): 587-591.
Yu Y, Zhao Y X, Shi D M, et al. Application of excimer laser in interventional therapy of complex coronary artery disease via radial artery[J]. *Chinese Journal of Interventional Cardiology*, 2016, 24(10): 587-591.
- [110] 谷涌泉, 郭连瑞, 齐立行, 等. 准分子激光消融联合药物球囊治疗下肢动脉慢性缺血 3 例[J]. *介入放射学杂志*, 2017, 26(1): 10-14.
Gu Y Q, Guo L R, Qi L X, et al. Excimer laser atherectomy combined with drug-eluting balloon angioplasty for the treatment of chronic ischemia of lower limbs: preliminary results in three patients[J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2017, 26(1): 10-14.
- [111] Sowada U, Kahlert H J, Voss F, et al. Excimer laser fiber coupling using pulse lengths between 15 and 300 ns [J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1023: 246-248.
- [112] Taylor R S, Leopold K E, Brimacombe R K. Long optical pulse excimer lasers for fiber optic delivery[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1041: 198-203.
- [113] 赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 纳秒激光诱导石英光纤端面损伤特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 5027-5034.
Zhao X H, Gao Y, Xu M J, et al. Studies on nanosecond laser induced damage to fused fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 5027-5034.
- [114] 刘冬生, 梁勳, 林颖, 等. Simulink 仿真指导放电准分子激光长脉宽的实验探究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210022.
Liu D S, Liang X, Lin Y, et al. Simulink simulation guiding the experimental exploration of long pulse width of discharge excimer laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210022.
- [115] Dijkkamp D, Venkatesan T, Wu X D, et al. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(8): 619-621.
- [116] 赵跃, 张智巍, 朱佳敏, 等. 面向实用化的第二代高温超导带材研究进展[J]. *电工电能新技术*, 2017, 36(10): 69-75.
Zhao Y, Zhang Z W, Zhu J M, et al. Progress of second generation high temperature superconductors for practical applications[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2017, 36(10): 69-75.
- [117] 张华, 杨坚, 刘慧舟, 等. 脉冲激光法制备涂层导体 YBCO 超导层的研究 [J]. *功能材料*, 2010, 41(3): 428-431.
Zhang H, Yang J, Liu H Z, et al. Study of YBCO superconducting layer using pulse laser deposition for coated conductor[J]. *Journal of Functional Materials*, 2010, 41(3): 428-431.
- [118] 刘勇胜, 胡兆初, 李明, 等. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. *科学通报*, 2013, 58(36): 3753-3769.
Liu Y S, Hu Z C, Li M, et al. Application of LA-ICP-MS in element analysis of geological samples[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(36): 3753-3769.
- [119] Alloncle G, Gilon N, Lienemann C P, et al. A new method for quantitative analysis of metal content in heterogeneous catalysts: laser ablation-ICP-AES[J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2009, 12(6/7): 637-646.
- [120] Guillong M, Horn I, Günther D. A comparison of 266 nm, 213 nm and 193 nm produced from a single solid state Nd: YAG laser for laser ablation ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, 18(10): 1224-1230.
- [121] Horn I, Guillong M, Günther D. Wavelength dependant ablation rates for metals and silicate glasses using homogenized laser beam profiles: implications for LA-ICP-MS[J]. *Applied Surface Science*, 2001, 182(1/2): 91-102.