

文章编号: 1001-3806(2017)04-0484-05

电激励准分子激光系统的电磁辐射和抑制

赵读亮^{1,2}, 梁 勳¹, 方晓东^{1,2*}

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

摘要: 为了抑制电激励准分子激光系统产生的强电磁干扰, 采用电磁辐射理论分析了准分子激光器电磁辐射机理, 确定了激光器辐射干扰源主要来源于激光器的主放电回路、出光口和氢闸流管; 采用近场探头分别对各关键部位不同距离电磁辐射进行了测试; 结合测试结果与电磁屏蔽原理对激光器电磁辐射进行了屏蔽设计和屏蔽效能测试, 针对准分子激光系统, 提出了抑制电磁干扰的几种措施。结果表明, 设计的屏蔽盒的屏蔽效能达到 40dB; 引入电磁干扰抑制措施后, 准分子激光系统能稳定可靠工作。该研究满足了工程实际要求。

关键词: 激光器; 电磁辐射; 屏蔽技术; 近场探头; 准分子激光

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.005

Electromagnetic radiation and inhibition of electric excitation excimer laser systems

ZHAO Duliang^{1,2}, LIANG Xu², FANG Xiaodong^{1,2}

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to prevent the strong electromagnetic interference produced by an electric excitation excimer laser system, the electromagnetic radiation mechanism of excimer laser was analyzed according to the principle of electromagnetic radiation and the main radiation sources were determined, i. e., the main discharge circuit, the light outlet and hydrogen thyatron. The key parts were tested by using a near-field probe respectively. Electromagnetic shielding design was implemented and shielding effectiveness was tested by combining the test results with the principle of electromagnetic shielding. And then, other several measures was also put forward to restrain electromagnetic interference in view of the excimer laser system. The results show that the effectiveness of the shielding box can reach 40dB and the excimer laser system is stable and reliable after the introduction of electromagnetic interference suppression measures. This study satisfies the practical requirement in engineering.

Key words: lasers; electromagnetic radiation; shielding technology; near field probe; excimer laser

引 言

准分子激光器因其波长短、热损伤小以及光子能量大等特性被广泛应用于科研、医疗和工业生产等领域^[1-3]。常用的准分子激光器其激励方式为放电激励, 放电电压在 20.0kV ~ 35.0kV, 放电时间在 10.0ns ~ 30.0ns, 工作在高压大电流快放电下必然会产生电磁干扰问题^[4-5], 这对准分子激光系统自身的稳定控制以及周围其它仪器设备造成影响, 阻碍准分子激光系统的产品化和商业化。参考文献[6]和参考文献[7]表明, 激光器的腔体结构、放电电压、工作模式和高压开关电源等是影响激光器电磁辐射能量的主要因素。准

分子激光辐射上能级寿命较短, 只有 1.0×10^{-8} s, 这要求准分子激光形成要有很高的抽运能量和抽运速率^[8], 其结果不仅有强的电磁辐射干扰, 而且具有强的传导发射干扰, 随着脉冲能量、脉冲上升陡度(越陡的脉冲会导致越宽的干扰频谱)和重复频率的提高, 其电磁干扰也增强^[9-10]。

本文中详细分析了准分子激光器电磁辐射机理, 采用近场探头测试了关键部位的电场和磁场分布, 重点分析了闸流管方向上电磁辐射特性; 最后根据测试结果进行了电磁辐射干扰抑制设计。

1 准分子激光器电磁辐射机理

1.1 准分子激光器辐射理论

根据电磁辐射理论, 激光器工作放电回路可等效于小环天线, 假设电流环面积为 S , 流过的电流为 $i = I_m \sin(\omega t)$, 其中 I_m 为最大振幅, ω 为角频率; 则在近

作者简介: 赵读亮(1988-), 男, 博士研究生, 现主要从事准分子激光技术与应用及脉冲功率技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2016-09-19; 收到修改稿日期: 2016-09-23

场区内,即 $r \ll \lambda / (2\pi)$ 的区域内,近似有^[11]:

$$E_\phi = \frac{-I_m S k^2}{4\pi\epsilon\omega r^2} \sin\theta \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$H_r = \frac{I_m S}{2\pi r^3} \cos\theta \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{I_m S}{4\pi r^3} \sin\theta \cos(\omega t) \quad (3)$$

式中, E_ϕ, H_r, H_θ 为球面坐标系下电流环路激励的电磁场矢量的分量, $E_r = E_\theta = 0, H_\phi = 0, \epsilon$ 为介电常数, r 为场源与测试点距离。

电场、磁场辐射方向图如图 1 所示。由(1)式~(3)式知,近似处理下,电流环路辐射的电场分量以 $1/r^2$ 衰减,磁场分量以 $1/r^3$ 衰减。

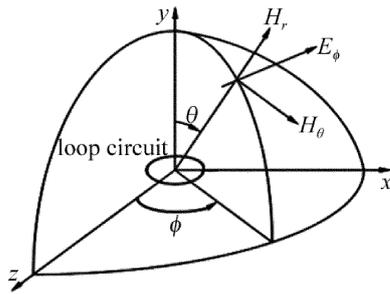


Fig. 1 Radiation model of small loop antenna

1.2 准分子激光器辐射分析

放电激励准分子激光器基本放电回路如图 2 所示。其中 S 为氢闸流管, C_1 和 C_2 为充电电容, MS_1 为磁开关, C_3 为峰化电容, L_2 为充电电感。

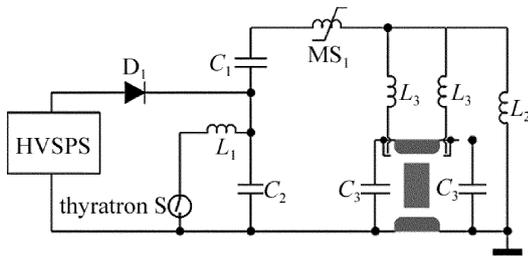


Fig. 2 Discharge circuit of an excimer laser

激光器放电过程分为 4 个过程:(1) 高压电源 (high voltage switch power supply, HVSPS) 通过回路 $D_1 \rightarrow C_2 \rightarrow HVSPS$ 和回路 $D_1 \rightarrow C_1 \rightarrow MS_1 \rightarrow L_2 \rightarrow HVSPS$ 分别对 C_1 和 C_2 进行充电,记回路总电流为 I_0 ,此过程为慢过程,一般时间为 ms 级;(2) 待 C_1 和 C_2 充电结束后触发闸流管导通, C_2 电压极性反转,过程时间在数百微秒;(3) MS_1 前端电压为 C_1 和 C_2 串联值,当施加在 MS_1 上的伏秒值达到设定值后, MS_1 导通,通过回路 $C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow MS_1 \rightarrow L_3 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2$ 对峰化电容充电,过程时间在几十纳秒,回路电流记为 I_1 ;(4) 峰化电容 C_3 上的能量在十几个纳秒通过回路 $C_3 \rightarrow$ 电极 $\rightarrow C_3$ 将能量沉积到工作气体中,此回路电流记为 I_2 。气体放电

后的 C_3 储存的剩余能量将会在回路中产生一定的衰减振荡,但振荡幅度值要小得多^[11]。

工作在高压快放电的氢闸流管是一个强电磁干扰源,当闸流管栅极加上触发脉冲时,栅阴间隙点火放电,形成等离子体,一般它所产生的 1.0MHz ~ 200.0MHz 的辐射干扰可能传播距离很远^[12-13]。

由激光器工作原理分析,其主要电磁辐射源包括:(1) 闸流管触发放电干扰;(2) 激光器主放电回路,即 C_1 与 C_2 向 C_3 的能量转移,对应 I_1 的电流回路;(3) 激光器出光口部分,这部分辐射电磁场主要由 I_1 与 I_2 综合作用,相比之下,预电离产生的电磁辐射微弱的多^[11]。

2 测试与分析

2.1 测试方案

测试设备采用罗德与施瓦茨公司生产的 HZ-15 系列近场电场探头 (RS-E-02) 和磁场探头 (RS-H-400-1),由于探头存在衰减因子 F ,测试的结果必须经过换算,换算公式如下:

$$E = V_E + 120.0 + F \quad (4)$$

$$H = V_H + 86.0 + F \quad (5)$$

式中,电场强度 E 和磁场强度 H 的单位分别为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 和 $\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$, V_E 和 V_H 分别为电场与磁场探头测试值,单位分别为 dBV/m , dBA/m 。

查探头资料可知探头衰减因子为 40.0dB,用快速示波器采集探头电压信号,并用软件进行傅里叶变换处理。在工程应用中,中控和机器操作位于激光头 1.0m 以内,因此选择测试距离为 20.0cm, 60.0cm 和 100.0cm。

由第 1.1 节中的分析可知,准分子激光器强电磁辐射源主要有闸流管开关、主回路和出光口。由于该系统的激光头已经被铝皮外壳包裹,只有出光口和闸流管处向外泄露电磁波,因此可以直接测量闸流管和出光口产生的电磁辐射,实际结构中,闸流管放电辐射和出光口辐射交织在一起,因此各个测试点的电磁辐射是多个辐射源共同作用的结果,以其中一种为主。

2.2 测试结果

准分子激光器电磁场的采集点包括闸流管处和出光口处,由于两处采集点只是方位不同,采集方法相同,限于篇幅,本节中只详述闸流管处的测试结果,同时直接给出出光口处的测试结果。

闸流管处的电磁辐射由激光器的主回路、闸流管和电极放电共同激励,以闸流管的激励为主。图 3 为 20.0cm 处磁场辐射测试结果。频域图中峰值对应的频率 f 为主要辐射频率,磁场辐射有 4 个主要辐射频

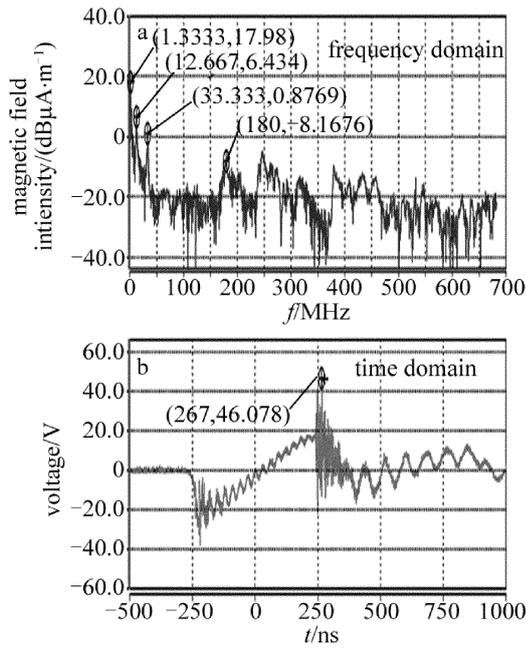


Fig. 3 Magnetic field in time domain and frequency domain at 20.0cm away from the thyatron

率,分别为1.3MHz,12.6MHz,33.3MHz和180.0MHz。据参考文献[8]表明,磁场基频主要和放电回路电流的转移常数有关,对于 I_1 回路产生的回路,其基频在1.0MHz~10.0MHz范围内,从放电电容沉积到激光工作气体中的电流 I_2 时间很短,一般基频在30.0MHz~60.0MHz左右,并且电流回路 I_2 引起的电磁干扰要比电流回路 I_1 引起的干扰强。因此可知,1.33MHz和12.66MHz主要是回路 I_1 和闸流管辐射产生的,33.3MHz主要是由回路 I_2 产生的。

图4为20cm处电场的测试结果。该处的电场幅

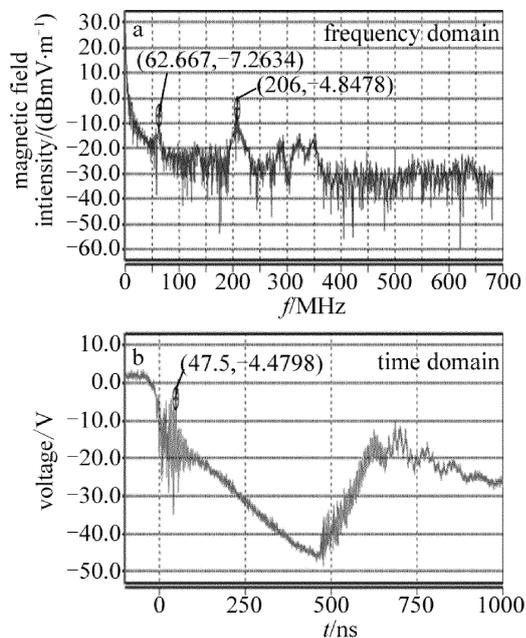


Fig. 4 Electric field in time domain and frequency domain at 20.0cm away from thyatron

射频率主要为低频、62.6MHz和208.0MHz。由参考文献[14]可知,该频段的电场正是对人体损害较大的频段,且幅值较大。因此,无论从人员保护的要求还是从保证电子设备稳定运行的要求出发,都需要对激光器放电系统进行干扰抑制。

对于出光口处,根据测试结果可知,磁场辐射主要有2个辐射频率,分别为58.0MHz和187.0MHz;电场辐射主要有4个辐射频率,分别为12.0MHz,63.0MHz,33.0MHz和187.0MHz。

图5和图6为闸流管和出光口方向上电磁场辐射

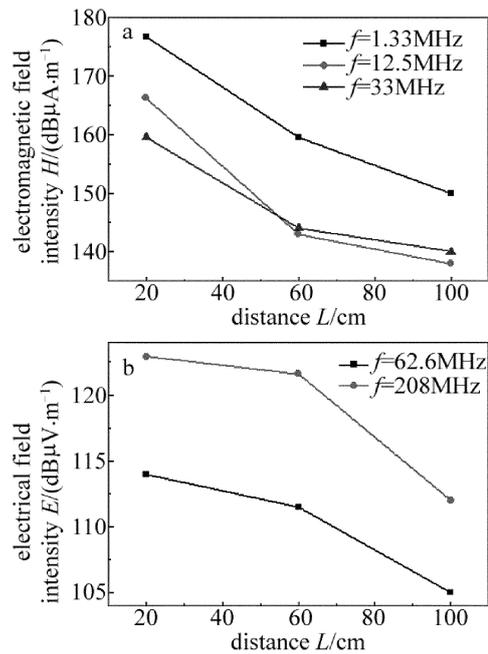


Fig. 5 Relationship between electromagnetic field intensity H , electrical field intensity E and distance L away from the thyatron

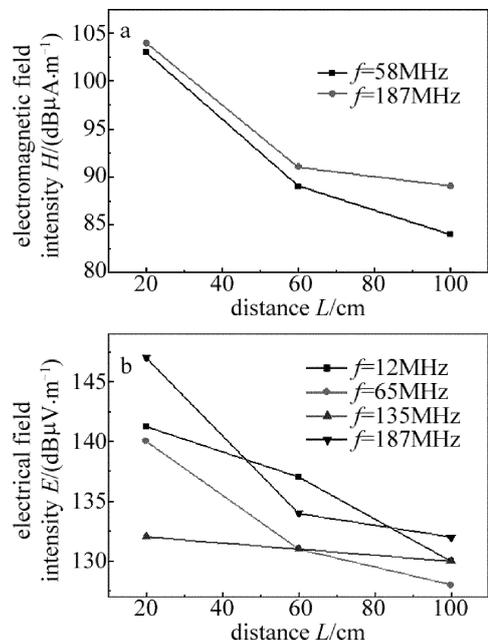


Fig. 6 Relationship between electromagnetic field intensity H , electrical field intensity E and distance L away from the outlet

强度随测量距离和频率的变化关系。可以看出,电磁场的强度随测量距离和频率的增大而减小,符合理论计算的变化规律。

2.3 测试结果分析

分析测试结果可以得出以下结论:(1)电磁辐射频段分为低频(0MHz~30.0MHz)和(30.0MHz以上)高频段,电磁场强度随测试距离和频率的增加而衰减,对于电磁辐射越低的频率,其衰减越快;根据波阻抗的定义计算可知,1.0m内激光器整体辐射场为低阻场;(2)由测试结果可得激光器在1.0m处整体电磁辐射情况,在20.0cm电场辐射强度最大值对应的频率为187.0MHz,磁场辐射强度最大值对应的频率为1.33MHz,该结果为后期电磁屏蔽提供了设计依据。

3 电磁干扰抑制措施

为了提高准分子激光系统的可靠性和实用性,采取措施抑制电磁干扰是必要的。由电磁兼容技术可知^[12-13],产生电磁干扰的必要条件有:电磁干扰源、传播路径以及敏感源。因此需从以上3个方面处理优化。

3.1 干扰源优化

由第1.1节中的分析可知,产生电磁辐射的根源是准分子激光器回路产生的大电流变化率和高压放电,因为峰值电流和电流变化率与辐射强度成正比关系,因此减少电流的峰值及其上升率会降低辐射能量,优化回路中充电电容和放电电容的比例减少气体击穿后的电流振荡,一定程度上降低辐射强度,但是由于准分子激光器的工作特性,通过降低回路峰值电流和电流上升率以达到降低辐射强度的目的是行不通的^[14-15],因此抑制干扰源传播途径和敏感源优化成为解决准分子激光器电磁辐射干扰(electromagnetic interference, EMI)问题的主要手段。

3.2 抑制干扰源传播途径

对于电磁辐射抑制最主要的措施是屏蔽技术的应用,根据电磁屏蔽原理,在进行屏蔽设计前,必须知道辐射源的特性,比如波阻抗、峰值频率分布,低频或高频等。在近场区,低频电场和磁场的屏蔽原理是不同的,高频和低频的屏蔽在屏蔽材料选择上也不相同。根据本文中的测试结果可知,该系统主要辐射频率在250.0MHz以内,波阻抗在50.0Ω~150.0Ω,属于低阻场,因此可以依据教程^[16]上的方法选择屏蔽体材料、厚度、形状以及孔位分布进行屏蔽设计;结合理论分析与实际机械强度等因素,最终确定屏蔽外壳厚度为2.0mm,材料为铝。表1为闸流管20.0cm处主要辐射频率屏蔽效能的测试数据(结果未转换)。由结果分

Table 1 Shielding effectiveness of main radiation frequency near by thyratron

frequency/ MHz	before shielding/ V	shielding/ V	shielding effectiveness/dB
1.33	16.7	-42.2	59.0
12.5	6.2	-44.5	51.0
33.0	-0.5	-48.5	48.0
62.5	-12.0	-64.0	52.0
206.0	-14.0	-56.0	42.0

析,金属外壳屏蔽效能达到Ⅱ级水平(40.0dB),但未达到Ⅰ级水平(60.0dB),主要是由屏蔽外壳开有空洞和风扇口等引起的。

3.3 敏感源优化

准分子激光系统中对电磁辐射最敏感的部分是中控系统,则对中控系统要采取必要的屏蔽措施,屏蔽效能的关键是屏蔽体的孔洞、缝隙、通风口等,因此在使用屏蔽体屏蔽敏感源时要尽量少在屏蔽体上开缝隙、开孔等,对于不能省略的电源信号等接口应加入滤波器处理,孔洞比如通风口要采用屏蔽网进行封闭;屏蔽体、系统外壳与屏蔽网之间要可靠连接。在硬件方面,可以加入抗干扰强的器件,比如光耦合器,隔离变压器,光电转换器件等。在软件程序方面,可以加入滤波,看门狗复位,程序模块化处理和时序优化等;例如准分子系统的能量反馈模块,能量探头采集激光器输出能量后进行最大值保持,然后数/模转换形成数字信号送给中控系统,采集的准确度与电压保持输出有直接关系,当强辐射干扰进入芯片输入后电压保持芯片输出最大值就不可预知,进而影响采集的准确性。

4 结论

准分子激光系统工作时产生的强电磁辐射来源于激光器的高压大电流快放电,本文中首先采用近场探头对该系统电磁辐射分布特性进行了详细测量,由测试结果可知,激光器主要的电场辐射频率分布在12.0MHz,63.0MHz,133.0MHz,187.0MHz和208.0MHz附近,主要磁场辐射频率分布在1.33MHz,12.66MHz,33.3MHz,58.0MHz和180.0MHz附近,依据测试结果和电磁兼容原理引入了屏蔽措施和其它抑制措施。实验结果表明:设计的屏蔽盒的屏蔽效能达到Ⅱ级水平,引入电磁干扰抑制措施后,准分子激光系统能稳定可靠工作,满足工程实际需求。

参考文献

- [1] ZHAO J M, GAO J, LIANG X, *et al.* Study on pulse charge power for a dual-chamber excimer laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1):97-100(in Chinese).
- [2] WANG X Sh, LIANG X, YOU L B, *et al.* Study on energy control algorithm for high-repetition-rate ArF excimer lasers[J]. *Laser Tech-*

- nology, 2012, 36(6):765-766(in Chinese).
- [3] TROKEL S L, SRINIVASAN R, BRAREN B. Excimer laser surgery of the cornea [J]. American Journal of Ophthalmology, 1983, 96(6): 710-715.
- [4] BHATIA M S, KUMAR G. On the EMI potential of various laser types[C]//Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 2001/02. New York, USA: IEEE, 2002: 3-5.
- [5] FANG X D, YU Y Sh, WANG J Y. Discharge performances of a 100W XeCl excimer laser[J]. Laser Technology, 1997, 21(4):255-256(in Chinese).
- [6] BHATIA M S, MADAN V K, DONGARE A S, *et al.* Mapping of radiation field from a discharge laser head[C]//Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 2001/02. New York, USA: IEEE, 2002:6-10.
- [7] GAYEN A, DAS B N, PODDAR D R, *et al.* Study of electromagnetic interference from a high power copper vapor laser [C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005. New York, USA: IEEE, 2005:847-850.
- [8] DENG G Q, ZHU Zh Q, HE L H. EMI and suppression methods in excimer laser system[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2005, 18(3):24-26 (in Chinese).
- [9] MENG F J, GUO L H, YANG G L, *et al.* Suppression of electromagnetic interference in high power TEA CO₂ laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2):177-181 (in Chinese).
- [10] SHI M M, JIANG H H, DENG G Q, *et al.* Development of controller for excimer laser based on optical fiber[J]. Laser Technology, 2009, 33(1):100-103(in Chinese).
- [11] GE X H, GUO L H, MENG F J, *et al.* Electromagnetic radiation test of high-power TEA CO₂ laser and its shielding cabin design[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 15(5):983-990 (in Chinese).
- [12] LÜ W H. The principle and application of electromagnetic compatibility[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 50-55 (in Chinese).
- [13] ZHOU Z M, JI A H. Electromagnetic compatibility technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 8-11 (in Chinese).
- [14] WANG J Y, XU P F, XU X D, *et al.* The characteristics of electromagnetic radiation produced by copper vapor laser[J]. Applied Optics, 1987, 8(4):167-168(in Chinese).
- [15] DENG G Y, YUAN D Ch, YANG Sh Y, *et al.* Electric parameter performances of a C-C transfer discharge pumped XeCl laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 15(6):332-335(in Chinese).
- [16] LIU S H, LIU J M, DONG X L. Electromagnetic wave shielding and absorbing material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 62-67(in Chinese).