DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.321 **中图分类号**：TN248.2 **文献标志码**：A

放电泵浦准分子激光充电电源工作模式分析和性能优化

沈启辉[1,2]，任嘉成[1,2]，邵景珍[1]，林 颖[1]，梁 勖[1]
(1.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，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：放电泵浦准分子激光在生物医疗领域存在一些独特的应用，但在工程化过程中，存在整机发热、电磁兼容等实际问题需要解决。介绍了准分子激光器的放电泵浦回路结构，分析了激光头与高压充电电源的电磁辐射、发热情况，比较了 LC 串联谐振式高压电容充电电源不同模式下的工作状态，并通过实验对比了不同工作模式下高压电容充电电源各部分的发热、电磁辐射情况。实验结果表明，回路开关管在开关频率 $f_s=f_r/2$ 的工作模式下，对比 $f_s \geqslant f_r$ 的工作模式，IGBT 结温下降 16.8 ℃，IGBT 损耗减少 83.7 W(降低了 82.8%)，有效降低了高压充电电源温度，提升了整机电光转换效率；磁场强度峰值减少 16.53 dB，电场强度峰值减少 20.05 dB，有效抑制了电磁辐射干扰。

关键词：准分子激光；电容器充电电源；LC 串联谐振；软开关

Working Mode Analysis and Performance Optimization of Discharge-pumped Excimer Laser Charging Power Supply

SHEN Qihui[1,2], REN Jiacheng[1,2], SHAO Jingzhen[1], LIN Ying[1], LIANG Xu[1]
(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Discharge-pumped excimer laser has some unique applications in the biomedical field. However, there still exist some practical problems to be solved in the process of engineering, such as machine heating and electromagnetic compatibility. The discharge-pumped circuit structure of excimer laser was introduced, the electromagnetic radiation and heat generation of the laser head and high-voltage charging power supply were analyzed, and the working states of an LC series resonant high-voltage capacitor charging power supply in different modes were compared. In addition, the heating and electromagnetic radiation of each part in the high-voltage capacitor charging power supply in different working modes were compared through experiments. Experimental results show that when the circuit switch tube worked in the mode of $f_s=f_r/2$, the IGBT junction temperature decreased by 16.8 ℃ compared with that in the mode of $f_s \geqslant f_r$, and the IGBT loss was also reduced by 83.7 W(i.e., 82.8 % in proportion) in the meantime, thus effectively reducing the temperature of the high-voltage charging power supply and improving the machine's electro-optical conversion efficiency. Moreover, the peak value of magnetic field intensity was reduced by 16.53 dB, and the peak value of electric field intensity was reduced by 20.05 dB, effectively suppressing the electromagnetic radiation interference.

Keywords: Excimer laser; capacitor charging power supply; LC series resonance; soft switching

收稿日期：2023-01-17；**修回日期**：2023-07-10；**录用日期**：2023-07-27；**网络首发日期**：2023-10-25
基金项目：中国科学院科研仪器设备研制资助项目(YJKYYQ20210007)；基础加强计划重点基础研究资助项目(2021-JCJQ-ZD-051-00-05)；中国科学院青促会资助项目(2018481)
This work is supported by Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences under the grant YJKYYQ20210007; Basic Strengthening Plan Key Basic Research Project under the grant 2021-JCJQ-ZD-051-00-05; Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences under the grant 2018481

准分子激光具有单光子能量高、波长短、对组织影响小、可以有效切断组织内的分子化学链等特性，被广泛应用于医疗领域[1]。针对白癜风、银屑病等，皮肤病治疗领域利用 308 nm 准分子激光的选择性作用于病变处，具有效果显著、安全性高等特点，近年来被广泛应用于临床治疗[2-4]。

目前，308 nm 准分子激光皮肤治疗仪被国外垄断，本文作者所在课题组正在开展 308 nm 准分子激光皮肤治疗仪的国产化工作，其中的关键技术已攻关完成[5-7]，但产品化集成中仍然存在着一些实际的工程问题需要解决，主要集中在整机发热、电磁辐射等方面。降低整机发热和电磁辐射有利于提升整体稳定性，过高的整机发热带来较大的回路和传感器温漂，影响能量输出的稳定性，导致在多病患依次使用的过程中必须停机散热，降低了治疗效率；过大的电磁辐射增加了对于敏感源的优化难度，产生的严重干扰不仅对控制回路的稳定性造成影响，还会对医生、病患的身体造成损害。

放电泵浦准分子激光器通常采用高压气体放电激励技术，是当前实用化准分子激光器几乎唯一使用的激励技术[1,8]。储能回路通过前端高压回路充电和储能，在高压开关的控制下通过脉冲形成回路，从而形成高压激励快脉冲，放电电极在高压快脉冲的作用下放电，激励放电区的气体介质发光，产生的深紫外光在谐振腔内振荡放大，形成激光脉冲输出。

首先，放电泵浦准分子激光器的放电电压通常为 20~30 kV，峰值电流为 10 kA 量级，放电能量为几十到上百焦耳，放电时间为百纳秒量级，其从开关模式的储能充电回路到激光放电过程，均存在精度、稳定性等实际工程难度，同时伴随着放电激励产生较强的电磁干扰[1,9]，这对于整机稳定运行和达到医疗器械的 EMC 国家标准来说是 1 个严峻的挑战。其次，准分子激光器的电光转换效率通常为 1%~3%[10]，大部分注入能量以热能的形式耗散，带来严重的整机发热，尤其是医疗设备希望外形紧凑，因此需要尽可能优化能量传递回路中各部件的效率。

本文介绍了准分子激光器的放电泵浦回路结构，分析了回路各部分在电磁辐射、热量产生 2 方面的特点，并着重研究高压电容充电电源，比较各种工作模式下的 IGBT 工作状态，测试了高压充电电源的电磁辐射、关键点温度，通过优化现有高压充电电源内部 IGBT 的工作模式，最终减少了整机的电磁辐射，降低了整机温度，在不改变脉冲能量、稳定性的同时，提升了整机电光转换效率。

1 放电泵浦回路分析

放电泵浦准分子激光器从电路结构上来看，主要由高压充电电源和激光头组成，典型的电路结构[1]如图 1 所示。

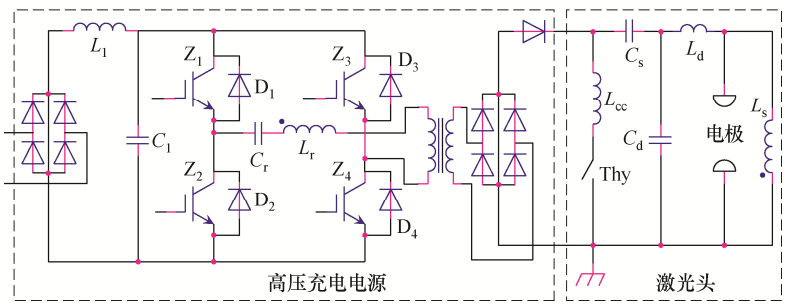


图 1 放电激励准分子激光器总体电路原理

Fig.1 Schematic of overall circuit of discharge-pumped excimer laser

1.1 激光器整体回路的电磁辐射及发热分析

激光器高压充电电源的主要结构为基于 LC 串联谐振的充电电路，如图 1 中左侧虚线框所示。激光头主要的电路结构为基于闸流管的快脉冲激励源，其结构简单、性能稳定，典型电路如图 1 中右侧虚线框所示。

整个系统的工作过程主要有以下 2 方面。

(1)产生大量的热量。从能量流动的过程分析，较大的发热量与高压充电电源效率、放电回路、腔体内气体能量沉积效率等有关。高压充电电源效率不高，内部的 IGBT 存在开关损耗，会产生一定的发热量；由于准分子激光器的电光转换效率很低，转换为激光的能量通常为 1%~3%，因此在激光头快放电的过程中，大部分能量以热量的形式损耗在激光气体放电腔内，小部分损失在放电回路中。

(2)产生较强的电磁辐射。电磁辐射一方面来自于高压充电电源，IGBT 体二极管、集射极流过谐振电流，IGBT 在高频驱动信号的作用下不断导通和关断，产生极高的电压、电流变化速率，高频换向的谐振电流同样带来较大的电流变化率，导致开关电流、电压波形上存在高次谐波，从而产生了较大的电磁辐射；另一方面来自于激光头部分，高电压、大电流存在于快放电过程中，会产生强电磁辐射。

对于激光头来说，首先激光泵浦需要足够高的泵浦功率密度，且要求充电电压为 20~30 kV，在储能电容 C_s 至放电电容 C_d 的能量转移过程中，峰值电流在万安培量级，电流上升率为 10^{11}~10^{12} A/s 量级[11]。因此，存在于激光头的高电压大电流快过程无法避免，无法主动减少产生的电磁辐射，只能采用被动的方式：针对空间中传播的电磁干扰，可通过屏蔽体减小电磁能量在空间的传播，减少对外电磁干扰；针对电路中传导的电磁干扰，采用滤波器的方式抑制共模干扰，使干扰信号的能量消耗在滤波器中[12]。

其次，针对激光头内部的热效率问题，大部分热量损耗在激光气体放电腔内，因此采用在气体放电腔内进行主动水冷循环散热的方式降温，通过良好的气体循环设计、热量耦合和介质传输，能够达到较好的冷却效果。

综合以上技术手段，激光头的整体模式基本固定，可实现较好地电磁辐射抑制和循环散热，优化空间较小，但作为能量注入源的高频开关式高压充电电源还有模式优化、性能提升的可能性。

1.2 高压充电电源的电磁辐射及发热分析

高压充电电源采用 LC 串联谐振充电方式，具有抗负载短路的优势，其充电速度恒定，是 1 种理想的高压电容充电方式[13]。

高压充电电源内部主要的发热源、电磁辐射源为 IGBT 模块及其组成的回路。IGBT 模块的工作电压为百伏量级，工作电流为数十安量级，开关频率为几十千赫兹量级。首先，周围环境中主要的电磁干扰来自导通和关断过程中产生的极高的电压、电流变化速率[14]。其次，流经 IGBT 的谐振电流的电流变化率较高，对外产生较大的电磁辐射。在运行期间，IGBT 产生的损耗包括通态损耗和开关损耗[15]，大部分损耗转换为热量耗散到空气中。

高压电源不同的工作模式会改变 IGBT 的开关速度和开关状态，对高压充电电源的状态产生影响。根据 IGBT 开关频率 f_s 与谐振频率 f_r 的不同，LC 串联谐振式充电主要有 3 种工作模式[16]：在 $f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，谐振电流波形连续，IGBT 模块处于零电流开通，在关断时有电流流经 IGBT 集射极，IGBT 处于硬关断模式，存在较大的关断噪声和关断损耗；在 $f_r/2<f_s<f_r$ 工作模式下，谐振电流波形连续，IGBT 模块处于零电流关断，开通时有电流流经 IGBT 集射极，IGBT 处于硬开通模式，存在较大的开通噪声和开通损耗；在 $f_s \leqslant f_r/2$ 工作模式下，IGBT 模块实现了零电流开通与关断，此时 IGBT 模块的开关噪声和开关损耗相对达到最小。

通过对以上 3 种情况进行分析，可以得到：调整 IGBT 的工作模式可以改变 IGBT 开通、关断时的开关噪声和开关损耗，从而优化高压充电电源的电磁辐射和发热等问题。

2 性能测试与分析

以实验室自制医疗用 308 nm 准分子激光皮肤治疗仪为例，分析、对比其内部高压电源各部分的发热、电磁辐射情况。

2.1 不同工作模式下的温度对比与分析

目前，实验室自制的医疗用 308 nm 准分子激

光皮肤治疗仪的高压充电电源工作在 $f_s \geqslant f_r$ 的工作模式下，为硬开关；优化后，调整 IGBT 模块开关频率为 $f_s=f_r/2$，为软开关，此时处于 $f_s \leqslant f_r/2$ 工作模式与 $f_r/2<f_s<f_r$ 工作模式的交界位置。

在 $f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，谐振电流波形连续，IGBT 模块处于硬关断状态，其主要由 2 组 IGBT 与其反向并联的体二极管组成，模块损耗同时包括 2 种：IGBT 模块的开关损耗来源于 IGBT 开关暂态过程中，电压、电流存在的交叠部分和体二极管的反向恢复过程；导通损耗来源于 IGBT 的饱和压降、体二极管的导通压降，模块损耗的外部表现为模块表面的温度升高。在开通初始阶段，谐振电流通过体二极管，IGBT 开通损耗较小；IGBT 关断瞬间，谐振电流通过 IGBT 的集射极并达到最大值，此时 IGBT 模块有较大的关断损耗，IGBT 的损耗计算为

$$E_{\mathrm{IGBT}}=\int_0^T V_{\mathrm{CE}}(t)I_{\mathrm{C}}(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：$V_{\mathrm{CE}}(t)$为 IGBT 集射极电压；$I_{\mathrm{C}}(t)$为 IGBT 集电极电流。

在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，谐振电流波形连续，IGBT 模块在开启的瞬间谐振电流为 0，谐振电流方向从流经体二极管转变为正向流经谐振回路，此时 IGBT 几乎没有开通损耗，处于软开通状态；在关断瞬间，谐振电流为 0，谐振电流方向从流经体二极管转变为逆向流经谐振回路，此时 IGBT 几乎没有关断损耗，处于软关断状态。

硬开关状态下充电时间约为 6.5 ms，平均充电电流为 86 mA；软开关状态下充电时间约为 7.5 ms，平均充电电流为 75 mA。由于软开关状态下充电周期变长，平均充电电流减小，整流桥、谐振电感、高压油箱表面的温度也会略有下降。

激光整机运行在重复频率为 100 Hz、充电电压为 20 kV、环境温度为 24 ℃的条件下，测得的各部分温度见表 1。

表 1 不同工作模式下高压电源各部分的表面温度

Tab. 1 Surface temperature of each part in high-voltage power supply in different working modes

工作模式	时间/ms	整流桥/℃	IGBT 模块/℃	谐振电容/℃	谐振电感/℃	高压油箱/℃
$f_s \geqslant f_r$	0	24.2	24.6	24.0	24.1	24.6
	10	35.9	52.1	26.7	40.9	28.5
	20	36.8	53.5	28.2	57.5	33.1
	30	37.4	54.4	30.3	61.2	35.4
$f_s=f_r/2$	0	24.5	24.8	24.2	24.7	25.8
	10	29.5	38.3	26.4	39.8	25.9
	20	29.9	40.1	27.1	52.6	27.9
	30	30.1	41.8	27.4	57.3	28.7

通过结果分析，在 $f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，IGBT 处于硬开关状态，高压充电电源存在较大的发热量，主要发热部分为 IGBT 模块和谐振电感。在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，IGBT 处于软开关状态，表面温度对比硬开关状态有显著的下降，对比运行 30 min 时，软开关状态下的 IGBT 表面温度相比硬开关状态下的 IGBT 表面温度下降 12.6 ℃，整流桥、谐振电容、谐振电感、高压油箱的表面温度同时也有所下降。

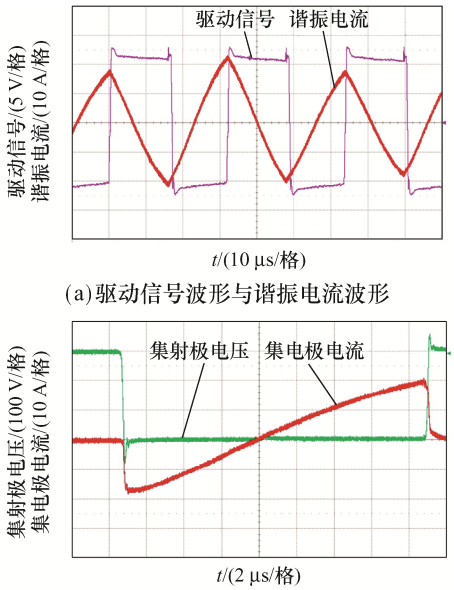
根据数据手册提供的热阻 R_{thjc} 可得估算 IGBT 结温的公式[17]为

$$R_{\mathrm{thjc}}=\frac{T_{\mathrm{junction}}-T_{\mathrm{case}}}{P_{\mathrm{total}}} \tag{2}$$

式中：T_{junciton}为 IGBT 结温；T_{case}为 IGBT 壳温；P_{total}为 IGBT 总耗散功率。在 $f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，IGBT 结温为 59.5 ℃；在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，IGBT 结温为 42.7 ℃，结温下降 16.8 ℃。功率器件的温度与开关损耗有关，功耗和结温成正比[18]，IGBT 结温的下降代表其损耗也在相应下降。

$f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，驱动信号及相应谐振电流波形如图 2(a)所示，图 2(b)为 IGBT 集射极电压 V_{CE}

与集电极电流 I_C 的波形图。



(a)驱动信号波形与谐振电流波形

(b)模块内单个IGBT集射极电压与集电极电流波形

图 2　硬开关状态下的波形

Fig. 2 Waveforms in hard switching state

IGBT 开关时间极短，计算损耗较为困难[19-21]，通过对 IGBT 集射极电压 V_{CE} 与集电极电流 I_C 进行积分[22-23]，得到 1 个开关周期内单个 IGBT 的总损耗为 1076 μJ。在 1 个完整充电周期内，计算得到 2 个 IGBT 模块的总损耗功率为

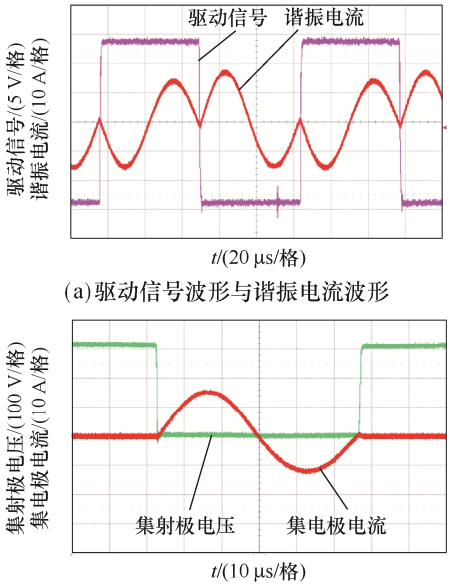
$$P_{\text{IGBTModules}} = NE_{\text{IGBT}}nF = 235\times1076\ \mu\text{J}\times4\times 100\ \text{Hz} = 101.1\ \text{W} \tag{3}$$

式中：N 表示 IGBT 在充电周期内的开关次数；n 表示 IGBT 的数量；F 表示充电重复频率。

$f_s=f_r/2$ 工作模式下，驱动信号及相应谐振电流波形如图 3(a)所示，IGBT 集射极电压 V_{CE} 与集电极电流 I_C 的波形如图 3(b)所示。积分得到 IGBT 模块的开关损耗接近 0，损耗主要由通态损耗构成，约为 623 μJ。在 1 个完整充电周期内，计算得到 2 个 IGBT 模块的总损耗功率为

$$P_{\text{IGBTModules}} = NE_{\text{IGBT}}nF = 70\times623\ \mu\text{J}\times4\times 100\ \text{Hz} = 17.4\ \text{W} \tag{4}$$

结果表明：$f_s=f_r/2$ 工作模式有效减少了单次 IGBT 损耗，单次损耗减少 453 μJ，对比原模式降低 42.1%。且在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，IGBT 的驱动信号频率为 $f_s=f_r/2$，相比于 $f_s\geqslant f_r$ 工作模式，至少减



(a)驱动信号波形与谐振电流波形

(b)模块内单个IGBT集射极电压与集电极电流波形

图 3　软开关状态下的波形

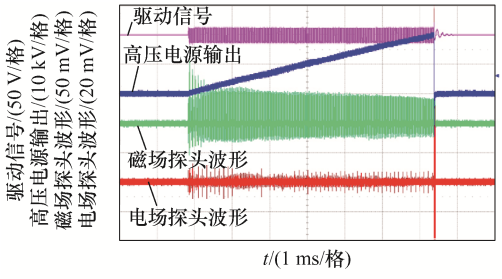
Fig. 3 Waveforms in soft switching state

小一半 IGBT 驱动信号的频率，由于 IGBT 的损耗与 IGBT 的开关次数成正相关，因此在 1 个完整充电周期内减少了 IGBT 的开关次数，相应减少了 IGBT 的总损耗，总损耗减少 83.7 W(降低了 82.8%)，也降低了 IGBT 的控制难度。$f_s=f_r/2$ 工作模式下，IGBT 工作在软开关状态，在减少了单次 IGBT 损耗的同时，也减少了 IGBT 开关次数，使得高压充电电源发热量大幅减少。

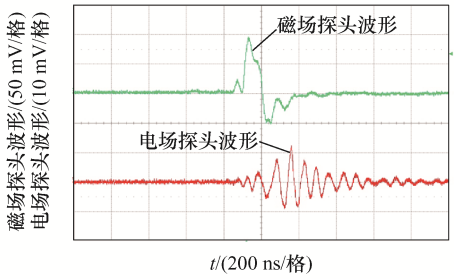
2.2　不同工作模式下的电磁辐射对比与分析

在 $f_s\geqslant f_r$ 工作模式下，IGBT 开通、关断的瞬间，产生高电压、电流的变化值且连续的谐振电流在 IGBT 之间快速切换，如图 3(b)所示，存在较大的电压变化率和电流变化率，此时 IGBT 会产生大量开关噪声，对外产生较大的电磁辐射；在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，IGBT 开通、关断的瞬间，回路中谐振电流、电流变化率约为 0，此时由电流变化导致的开关噪声几乎消失，但是 IGBT 两端仍然存在电压的瞬间变化，还是会对外产生少量的电磁辐射。

采用罗德与施瓦茨公司近场探头测量高压充电电源电磁辐射的情况，测试距离为距离高压充电电源 15 cm 处。图 4(a)所示为工作在 $f_s\geqslant f_r$ 工作模式下的电场、磁场时域波形图，图 4(b)所示为电场、磁场探头测试波形的局部展开图。



(a)完整充电周期内电场、磁场整体时域波形

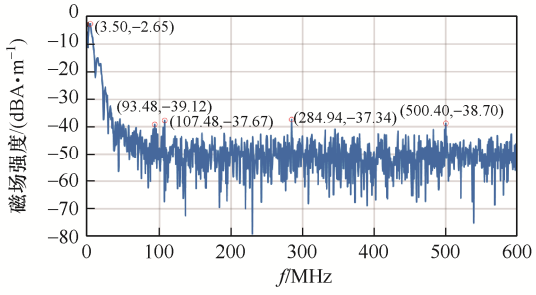


(b)电场、磁场探头测试波形

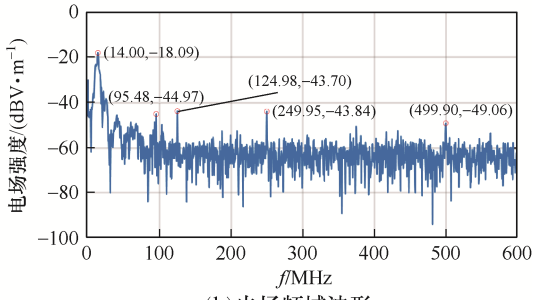
图 4 硬开关状态下的电场、磁场波形

Fig. 4 Waveforms of electric and magnetic fields in hard switching state

在 $f_s \geqslant f_r$ 工作模式下，IGBT 处于硬关断模式，存在较大的开关噪声和关断损耗，高压充电电源对外有较强的电磁辐射，磁场测试波形的幅值约为 50 mV，电场测试波形的幅值约为 12 mV。图 5 为磁场、电场频域波形，对磁场、电场波形进行



(a)磁场频域波形



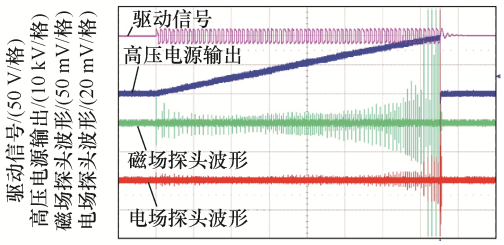
(b)电场频域波形

图 5 硬开关状态下的磁场、电场频域

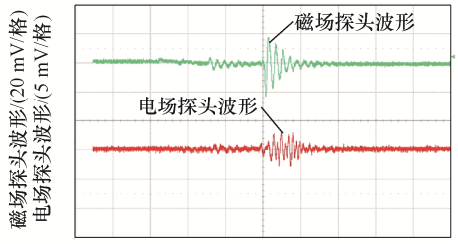
Fig. 5 Frequency-domain of magnetic and electric fields in hard switching state

频谱分析，发现其中含有丰富的高次谐波分量，主要集中在低频段(30 MHz 以内)，磁场强度最大值对应频率为 3.50 MHz，达到−2.65 dBA·m^{-1}，电场强度最大值对应频率为 14.00 MHz，达到−18.09 dBV·m^{-1}。

在 $f_s=f_r/2$ 工作模式下，如图 6(a)所示，可以看到在充电周期的结束阶段，电磁辐射有明显变大，这与控制方式有关，由于开关周期是不变的，开关频率与谐振频率之间存在微小误差，随着充电时间的变长误差累积，最终导致 IGBT 工作在非软开关状态。



(a)完整充电周期内电场、磁场整体时域波形



(b)电场、磁场探头测试波形

图 6 软开关状态下的电场、磁场波形

Fig. 6 Waveforms of electric and magnetic fields in soft switching state

在高压电源充电过程中的电场波形、磁场波形的幅值均得到有效地降低，磁场测试波形的幅值约为 20 mV，电场测试波形的幅值约为 4 mV。软开关状态下的磁场、电场频域如图 7 所示，对磁场、电场波形进行频谱分析，磁场强度最大值对应频率为 10.49 MHz，达到−19.18 dBA·m^{-1}，电场强度最大值对应频率为 10.49 MHz，达到−38.14 dBV·m^{-1}。

在 $f_r/2<f_s<f_r$ 工作模式下，电磁辐射情况较为恶劣，如图 8(a)所示，IGBT 处于软关断、硬开通状态，开通时谐振电流较大，带来较大的开通损耗和

开关噪声。如图 8(b)所示，在此情况下，对比前 2 种模式，电磁辐射的情况最为严重，磁场测试波形的平均最大幅值约为 60 mV，电场测试波形的平均最大幅值约为 10 mV。

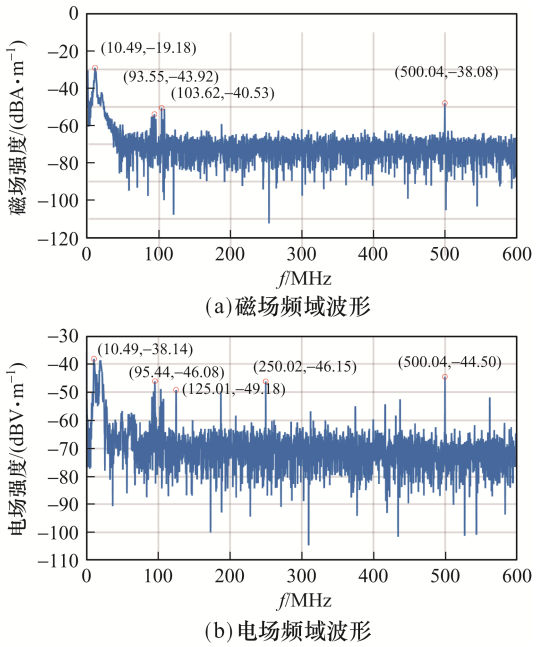


图 7　软开关状态下的磁场、电场频域

Fig. 7 Frequency-domain of magnetic and electric fields in soft switching state

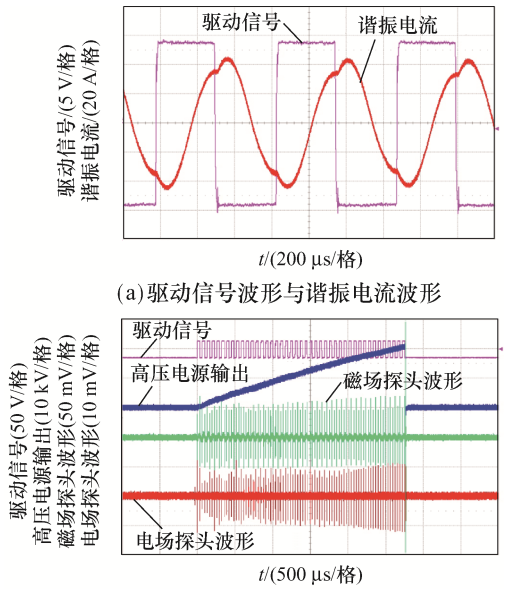


图 8　$f_r/2<f_s<f_r$ 工作模式下的磁场、电场波形

Fig. 8 Waveforms of magnetic and electric fields in working mode of $f_r/2<f_s<f_r$

3　结论

本文针对放电泵浦准分子激光整机发热、电磁兼容的实际工程问题，从全桥串联谐振式高压电容充电电源不同工作模式入手，分析不同工作模式下 IGBT 的状态、温度、电磁干扰情况。医疗用放电泵浦准分子激光系统由于后端激光头的整体模式基本固定，可调整、优化空间较小，但作为能量注入源的高频开关式高压充电电源还有模式优化、性能提升的可能性，因此提出了针对整机的能量注入源优化，改变其 IGBT 工作频率的方法，使高压充电电源工作在软开关模式，从而优化其发热量、电磁辐射干扰强度，使得整机满足医疗器械质量管理规范。

实验结果表明，回路开关管工作在 $f_s=f_r/2$ 软开关工作模式相对于工作在 $f_s\geqslant f_r$ 硬开关工作模式时 IGBT 结温降低 16.8 ℃，IGBT 损耗减少 83.7 W(降低了 82.8%)，有效降低了高压充电电源的温度，提升了整机电光转换效率；磁场强度峰值减少 16.53 dB，电场强度峰值减少 20.05 dB，有效抑制了电磁辐射干扰。同时，$f_s=f_r/2$ 的工作模式也存在高压电源的充电电流相对较小的情况，对于激光系统来说，需要综合考虑工作重复频率、充电脉冲能量等参数需求。

总的来说，合理设计高压电源逆变回路开关管的工作状态，可以有效降低整机发热，抑制电磁辐射干扰，在相同激光功率情况下减小平均充电电流，有效实现整机电光转换效率的提升，满足工程化实用准分子激光仪器设备的稳定可靠运行。

参考文献：

[1] 余吟山，游利兵，梁勖，等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, et al. Progress of excimer lasers technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270. (in Chinese)

[2] 法莹，刘华绪. 308 nm 准分子激光联合他克莫司软膏

治疗面部白癜风 656 例疗效评价[J]. 中国麻风皮肤病杂志, 2016, 32(5): 281-283.
Fa Ying, Liu Huaxu. Assessment of the 308 nm excimer laser combined with topical tacrolimus in the treatment of facial vitiligo [J]. China Journal of Leprosy and Skin Diseases, 2016, 32(5): 281-283. (in Chinese)

[3] 雷厉, 黄进华, 曾庆海, 等. 308 nm 准分子激光治疗 207 例稳定期白癜风的疗效及影响因素[J]. 中南大学学报(医学版), 2016, 41(9): 979-983.
Lei Li, Huang Jinhua, Zeng Qinghai, et al. Efficacy and influential factors for 308 nm excimer laser in treatment of 207 stable vitiligo patients [J]. Journal of Central South University (Medical Science), 2016, 41(9): 979-983. (in Chinese)

[4] 徐珊珊, 吴桐, 李晃旮, 等. 308 nm 准分子激光联合他克莫司软膏治疗眼睑处白癜风的疗效观察[J]. 临床皮肤科杂志，2021(3): 169-172.
Xu Shanshan, Wu Tong, Li Laga, et al. Clinical observation of 308 nm excimer laser combined with tacrolimus ointment in the treatment of vitiligo in eyelid [J]. Journal of Clinical Dermatology, 2021(3): 169-172. (in Chinese)

[5] 刘毅, 方晓东, 梁勖, 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): 6-11.
Liu Yi, Fang Xiaodong, Liang Xu, et al. 308 nm XeCl excimer laser system used for treatment of vitiligo [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 6-11. (in Chinese)

[6] 赵读亮, 李文洁, 梁勖, 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 Duliang, Li Wenjie, Liang Xu, et al. Study on energy stability for excimer laser skin therapeutic apparatus [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1206001. (in Chinese)

[7] 刘冬生, 梁勖, 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 Dongsheng, Liang Xu, Lin Ying, 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. (in Chinese)

[8] 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 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)

[9] 梁晓琳, 包本刚, 张丹. 医用准分子激光器激光介质实时补给控制系统[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 461-464.
Liang Xiaolin, Bao Bengang, Zhang Dan. The real-time supply control system of laser medium in medical excimer lasers [J]. Applied Laser, 2016, 36(4): 461-464. (in Chinese)

[10] 方向平. 准分子激光器的发展和应用[J]. 激光与红外, 1987, 17(2): 10-15.
Fang Xiangping. Progress of excimer lasers and its applications [J]. Laser & Infrared, 1987, 17(2): 10-15. (in Chinese)

[11] 梁勖, 沈启辉, 邵景珍, 等. 放电泵浦深紫外准分子激光关键技术与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 60-73.
Liang Xu, Shen Qihui, Shao Jingzhen, et al. Discharge-pumped excimer laser technologies and applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 60-73. (in Chinese)

[12] 王威, 徐抒岩, 杨絮. 抑制电磁干扰屏蔽技术的研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 71-74, 119.
Wang Wei, Xu Shuyan, Yang Xu. Research on the shielding technology for EMI suppression [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 71-74, 119. (in Chinese)

[13] 钟和清, 徐至新, 邹云屏, 等. 寄生电容对串联谐振电容器充电电源特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 40-44.
Zhong Heqing, Xu Zhixin, Zou Yunping, et al. Effects of parasitical capacitors on charging characteristic of series resonant ccps [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 40-44. (in Chinese)

[14] 李康旭, 李东辉. 高压 IGBT 模块通断过程电磁兼容问题研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(12): 142-143, 146.
Li Kangxu, Li Donghui. Study on electromagnetic compatibility of high-voltage IGBT module through process [J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(12): 142-143,

146. (in Chinese)

[15] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 159-163.
Hu Jianhui, Li Jingeng, Zou Jibin, et al. Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 159-163. (in Chinese)

[16] 曹沛, 徐向宇, 马英麒. 基于 LC 全桥串联谐振的脉冲功率电源设计[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 68-70, 74.
Cao Pei, Xu Xiangyu, Ma Yingqi. Design of pulsed power supply based on LC full-bridge series resonant converter [J]. Power Electronics, 2017, 51(5): 68-70, 74. (in Chinese)

[17] 滕为荣, 居长朝. 功率器件热阻的测量研究分析[J]. 电子与封装, 2011, 11(10): 18-22.
Teng Weirong, Ju Changchao. An investigation of thermal testing and analysis for power MOSFET device [J]. Electronics & Packaging, 2011, 11(10): 18-22. (in Chinese)

[18] 魏云海, 陈民铀, 赖伟, 等. 基于 IGBT 结温波动平滑控制的主动热管理方法综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1415-1430.
Wei Yunhai, Chen Minyou, Lai Wei, et al. Review on active thermal control methods based on junction temperature swing smooth control of IGBTs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1415-1430. (in Chinese)

[19] 白保东, 陈德志, 王鑫博. 逆变器 IGBT 损耗计算及冷却装置设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 97-106.
Bai Baodong, Chen Dezhi, Wang Xinbo. Loss calculation of inverter IGBT and design of cooling device [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 97-106. (in Chinese)

[20] 李玲玲, 许亚惠, 李志刚. 基于电-热耦合模型的 IGBT 模块结温计算方法[J]. 电源学报, 2016, 14(6): 23-28.
Li Lingling, Xu Yahui, Li Zhigang. Calculation method of IGBT module junction temperature based on electro-thermal coupling model [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(6): 23-28. (in Chinese)

[21] 王希平, 李志刚, 姚芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1636-1646.
Wang Xiping, Li Zhigang, Yao Fang. Power loss calculation and junction temperature detection of IGBT devices for modular multilevel valve [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1636-1646. (in Chinese)

[22] 熊刘涛，李国丽，孙泽辉. 基于热耦合分析的 IGBT 损耗与结温估算研究[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 306-315.
Xiong Liutao, Li Guoli, Sun Zehui. Estimation of IGBT loss and junction temperature based on thermal coupling analysis [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 306-315. (in Chinese)

[23] 唐圣学, 张继欣, 姚芳, 等. IGBT 模块寿命预测方法研究综述[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 177-194.
Tang Shengxue, Zhang Jixin, Yao Fang, et al. An overview of lifetime prediction methods for IGBT power module [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 177-194. (in Chinese)



沈启辉

作者简介：

沈启辉(1997—)，男，硕士。研究方向：准分子激光和光电子，高压。E-mail：qhshen@mail.ustc.edu.cn。

任嘉成(1998—)，男，硕士。研究方向：准分子激光和光电子，高压和测控。E-mail：jiachengren@yeah.net。

邵景珍(1979—)，女，博士，副研究员。研究方向：光电功能材料及其应用。E-mail：jzshao@aiofm.ac.cn。

林颖(1989—)，女，大专，实验师。研究方向：激光技术。E-mail：linying@aiofm.ac.cn。

梁勖(1982—)，男，通信作者，博士，研究员。研究方向：准分子激光和光电子，高压和测控。E-mail：liangxu@aiofm.ac.cn。

(责任编辑：孙美菊)