

文章编号: 1001-3806(2009)02-0191-04

医用激光器闪光灯的准谐振触发预燃技术

马 聪, 叶志生*, 张贵忠, 任国权, 撒 昱

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 为限制 Nd:YAG 激光器闪光灯抽运源在触发预燃时的功耗和电磁干扰, 以符合国家关于医用电气设备对电磁兼容性的要求, 研发了准谐振腔体触发预燃技术。由于脉冲变压器的寄生参量无法消除, 会在电路中产生复杂的振荡过程。利用这一谐振特性, 通过调节触发频率, 使之与谐振频率相同, 达到准谐振状态点燃闪光灯。实验证明该电路稳定可靠, 其峰值电压可降到 10kV 以下, 远低于同类闪光灯触发电压 16kV 的标称值。结果表明, 该电路完全达到了国家关于医用电气设备对电磁兼容性的标准。

关键词: 激光技术; 闪光灯; 电磁兼容; 准谐振式触发

中图分类号: TN78 **文献标识码:** A

Quasi-resonant triggering and preignition technology in flash-lamp of medical laser

MANG Cong, YE Zhi-sheng, ZHANG Gui-zhong, REN Guo-quan, SA Yu

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to restrict the power dissipation and electromagnetic interference when the flash-lamp-pumped system of solid laser is at the time of burst and preignition, the technology of quasi-resonant triggering and preignition was developed. Based on this technology, a long-pulsed medical Nd:YAG laser was designed to meet the electromagnetic compatibility requirements of national medical electrical equipment. Because parasitic parameters of the pulse transformer can not be eliminated, complicated oscillation should occur in the circuit. Making use of this resonance characteristic of the pulse transformer, the triggering frequency was adjusted the same as the resonant frequency, namely, quasi-resonant state, to ignite flash-lamp. The experiments proved this circuit was reliable and stable. The value of triggering-pulsed peak voltage could descend below 10kV, much lower than the nominal triggering voltage, 16kV. The results show that the circuit completely meets the national electromagnetic compatibility standards on medical electrical equipment.

Key words: laser technique; flash-lamp; electromagnetic compatibility; quasi-resonant triggering

引 言

闪光灯的抽运通常是由高压触发脉冲来启动, 这必然对周围电路产生强烈的电磁干扰。近几年国家新颁布的医药行业标准中, 对医用电气设备的电磁发射和电磁抗扰度都做出了与国际标准接轨的新规定^[1], 这对长脉冲 Nd:YAG 激光治疗机的闪光灯抽运电源的设计提出了降低电磁干扰的更高要求。为此作者设计了准谐振式触发预燃电路以降低触发电压, 并缩短了其作用时间, 实验表明, 可有效降低电磁干扰的力度。

1 激光治疗机的抽运原理

近些年, YAG 激光器以其卓越的性能在激光医疗领域被广泛应用^[2], 近期临床研究发现, 长脉冲激光能更好地治愈皮肤类疾病, 为此作者进行了长脉冲 Nd:YAG 激光器的研制。目前要使固体激光器按一定频率每次发射长达上百毫秒的大能量长脉冲激光, 仍首选闪光灯抽运, 而且氪灯线状光谱能更好地与 Nd:YAG 的吸收谱相匹配^[3], 所以, 选用脉冲氪灯作为长脉冲 Nd:YAG 激光治疗机的抽运源。

作者论述的长脉冲 Nd:YAG 激光治疗机的抽运电路原理如图 1 所示, 其工作程序为: 首先, 触发电路在氪灯两端产生脉冲高压将灯内气体电离击穿; 与此同时, 灯两极约 1kV 的预置电压便使氪灯进入直流低压的预燃状态; 最后, 利用单片机控制 IGBT 斩波器, 把储存在 0.1F 电容内的主电源能量按设置的工作频率注入氪灯使之进入强弧光脉冲放电状态, 该强脉冲抽

基金项目: 天津市科技发展计划资助项目 (06YFSZSF00400)

作者简介: 马 聪 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光医学与应用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zsy@tju.edu.cn

收稿日期: 2008-01-11; 收到修改稿日期: 2008-02-27

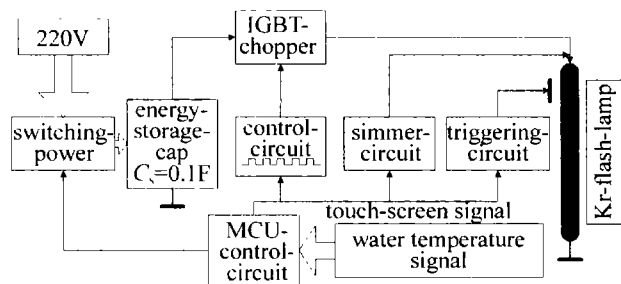


Fig. 1 Schematic diagram of pumping Kr lamp power in long-pulsed YAG laser

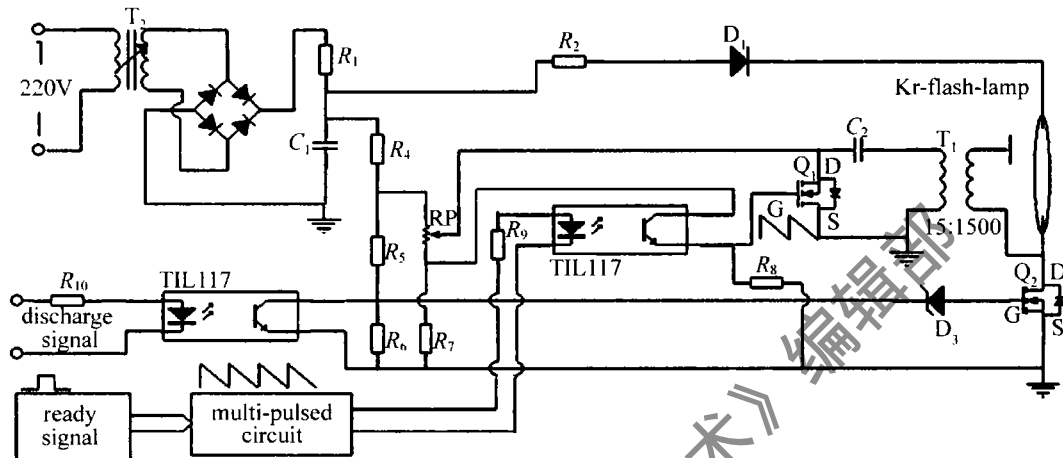


Fig. 2 Quasi-resonant-triggering and simmer circuit

态,并且触发频率和触发电压具有可调性。市电经可调隔离变压器变压,通过全桥整流向储能电容 C_1 充电,使其两端电压 $V_{C1} \approx 1\text{kV}$,该电压经镇流电阻 R_2 、高压隔离二极管 D_1 加到脉冲氪灯两端。该电路处于待机状态时,经电位器 RP 调节 C_2 上的电压 V_{C2} ,当触摸屏单片机控制系统发出 ready 信号后,经多脉冲电路产生几个脉冲信号来控制 MOSFET 晶体管 Q_1 的通断,

运光波经漫反射聚光腔辐射到 Nd:YAG 激光晶体上,进而从谐振腔产生激光输出。在整个抽运过程中,触发电路是电磁干扰的主要来源,将会对单片机控制程序和 IGBT 驱动等弱电系统造成干扰,影响其正常工作。

2 脉冲氪灯预燃触发电路

作者设计的预燃触发电路如图 2 所示,采用触摸屏控制单片机系统使氪灯进入触发预燃和解除预燃状

并使 C_2 和脉冲升压变压器 T_1 进入准谐振状态,由 T_1 副边产生的高压触发脉冲将氪灯电离击穿^[4]。由于氪灯具有负阻性特征,随着电离击穿的同时,一直加在氪灯两端的直流电压便为其提供一定的预燃电流,使氪灯保持电离通道并进入小电流预燃状态。

触摸屏发出 ready 单脉冲指令进入图 3 所示的多脉冲电路,由 NE555 构成的“大占空比周期可调的振

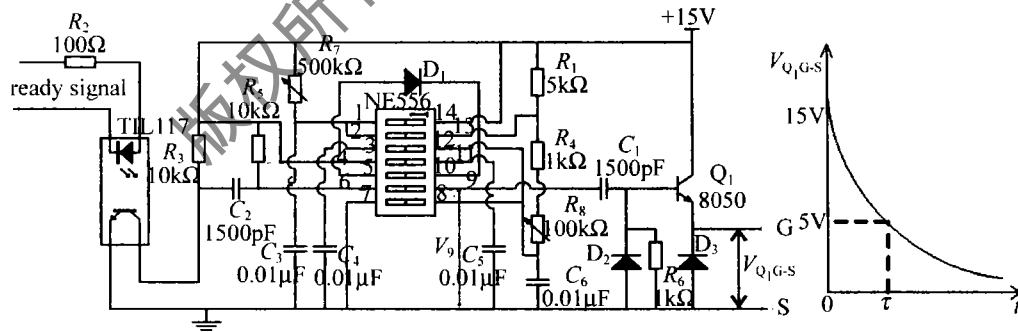


Fig. 3 Multi-pulsed circuit and diagram of $V_{Q1,G-S}$

荡器”可形成间隔和个数可调的多脉冲,并经 C_6 、 R_4 、三极管 8050 微分放大后,得到图 2 中的功率 MOSFET 管 Q_1 的驱动脉冲信号: $\tau = C_1 R_6 \ln(15\text{V}/5\text{V}) = 1500\text{pF} \cdot 1\text{k}\Omega \cdot \ln 3 \approx 2\mu\text{s}$ 。

3 准谐振式触发技术

3.1 传统的单次和多次触发的缺点

目前触发电路多采用单次高压腔体触发方式,它

的电路简单,易于实现,但触发脉冲峰值电压不低于厂商给定的标称值 16kV 。这不仅给预燃电路带来大的电阻损耗,而且高压脉冲引起的电磁脉冲干扰非常强烈,干扰频谱宽且传输距离远,在干扰源周围的用电设备均会受到不同程度的影响^[5]。多次触发方式虽然触发脉冲峰值电压可适当降低,但作用时间大大延长(约几毫秒),其综合效果仍难把电磁干扰降到允许的范围。

为验证上述论点,分别检测了单次和多次的触发过程,并用 Tektronix 示波器和高压探头 P6015A 记录了氪灯腔体触发时腔体与氪灯阴极间的电压 V_L 瞬变过程,如图 4 所示。单次触发时脉冲峰值电压高达 17kV;而

多次触发时,脉冲峰值电压最高才 7kV,作用时间不小于 5ms。多次触发使触发脉冲峰值电压适当降低的原因是氪灯在上个高压脉冲作用未消失前再次受到高压脉冲而加重电离击穿,致使其电离程度逐渐增强。

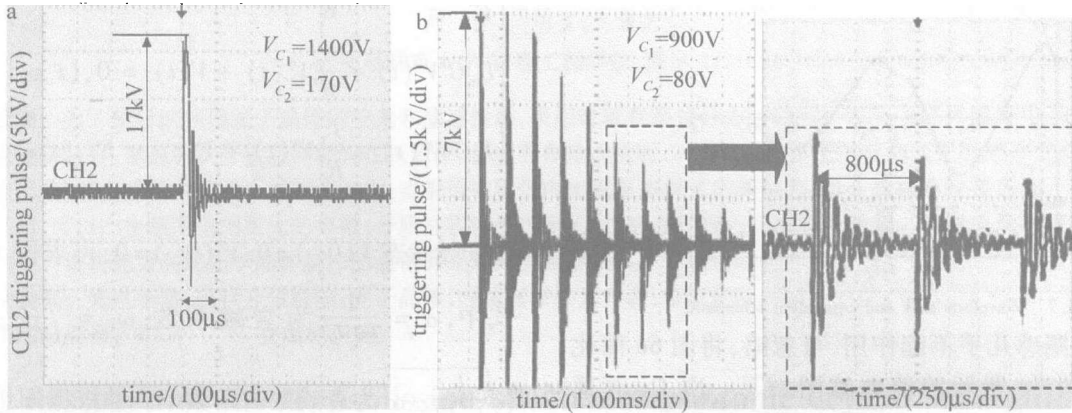


Fig. 4 Waveform of triggering voltage at the mode of single pulse and multi pulse

a—single-pulsed triggering b—multi-pulsed triggering

3.2 准谐振式触发的优点

由高频磁芯铁氧体构成的大变比(15:1500)脉冲变压器在脉冲式工作时,因该变压器绕制和结构必然会有分布电容和漏感,它们在脉冲变压器触发电路中起决定作用。当脉冲结束时,该电路中所有的电抗性元件中都会储存了一定的电能和磁能,因此总伴有复杂的振荡过程^[6],如图 4 中触发脉冲引起的欠阻尼振荡。利用脉冲变压器的谐振特性,通过提高触发脉冲频率,并逼近其阻尼振荡周期,让振荡脉冲与触发脉冲相叠加,则形成准谐振式触发特性。

采用准谐振式触发方式点燃氪灯,腔体触发电压波形图如图 5 所示,曲线 1 是多次触发的控制信号,曲

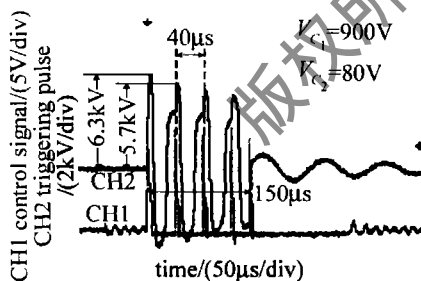


Fig. 5 Waveform of triggering voltage at the mode of quasi-resonance

线 2 是高压测头测试的腔体触发波形图,当 Q_1 导通时,腔体与氪灯阴极间的电压在振荡脉冲电压基础上触发上升。振荡脉冲与触发脉冲相重叠,不仅提高了峰值电压,而且增大了脉冲宽度。实验证明与单次和多次触发相比,准谐振式触发集中两者优点既能减小触发峰值电压,又能缩短其作用时间(约 150μs),因此可产生相对更少的电磁辐射。

3.3 准谐振式触发的理论分析

先将图 2 中的 Q_1 等效为一个开关,因其导通时间

非常短(不大于 2μs),所以电容 C_2 则是局部放电的储能器,可将 Q_1 和 C_2 等效为脉冲电压源 $E^{[6]}$ 。并且在设计触发电路时,不仅要考虑脉冲变压器的参量与结构,还要考虑腔体与氪灯这个负载的特性。负载具有一定的容性分量,可等效为一个小电容 C_1 和大电阻 R 并联,其等值线路如图 6a 所示。当考虑到变压器漏感

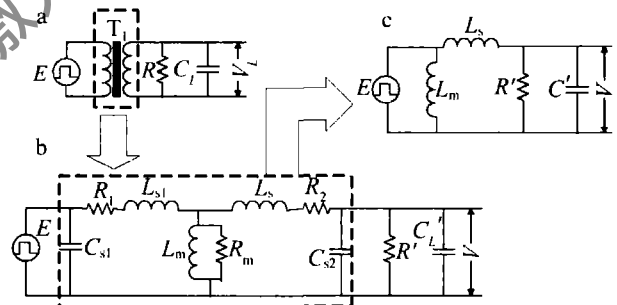
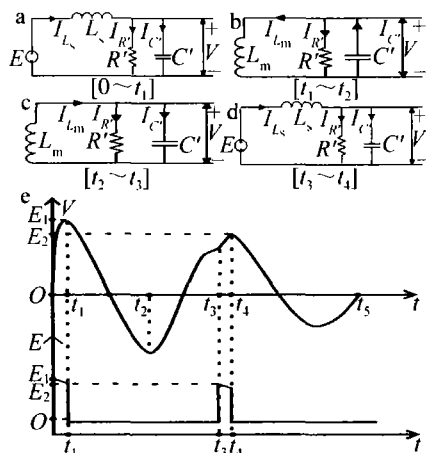


Fig. 6 Predigesting diagram of the model of transformer

和分布电容时。图 6b 中 L_{s1} 表示初级漏感, L_s 表示次级漏感折算到初级后的等效漏感, L_m 表示磁化电感; R_1 表示初级绕组电阻, R_2 表示次级绕组电阻折算到初级后的等效绕组电阻, R_m 表示变压器铁损的折算阻值; C_{s1} , C_{s2} 表示折算到初级的相应等效分布电容。 C_L' 和 R' 表示负载折算到初级后的等效阻抗。考虑到原边匝数很少, C_{s1} , L_{s1} , R_1 很小,可忽略;并且采用高磁导率铁心,涡流损耗很小,在导通时相对于 L_m , R_m 分流很小,也可略之;因变压器变比 $n = 100$,所以 R_2 只有次级绕组电阻的万分之一,亦略之^[7],并把次级绕组分布电容与负载等效电容合并得 C' ,从而可将图 6b 简化为如图 6c 所示电路。

由于磁化电感 L_m 远大于漏感 L_s ,在 Q_1 开通 $[0 \sim t_1]$ 时,磁化电感的分流非常小,可忽略磁化电感,将图 6c 简化为图 7a 所示等值电路图;在关断 $[t_1 \sim t_2]$,

Fig. 7 Waveform of V and equivalent schematic

$[t_2 \sim t_3]$ 时,漏感几乎不起作用,可忽略,将图 6c 简化为图 7b ~ 图 7c 所示等值电路图。下一次 Q_1 开通 $[t_3 \sim t_4]$ 时,可将图 6c 简化为图 7d 所示等值电路图。

根据基尔霍夫电压定律和元件的电压电流约束方

$$V(t) = \begin{cases} E_1 - E_1 e^{-\alpha t} (\cos \omega_1 t + \alpha \sin \omega_1 t), & (t \in [0 \sim t_1]) \\ V(t_1) e^{-\alpha(t-t_1)} \left[\cos \omega_2(t-t_1) + \left(\alpha + \frac{1}{R} \right) \sin \omega_2(t-t_1) \right], & (t \in (t_1 \sim t_2]) \\ V(t_2) e^{-\alpha(t-t_2)} [\cos \omega_2(t-t_2) + \alpha \sin \omega_2(t-t_2)], & (t \in (t_2 \sim t_3]) \\ E_2 - [E_2 - V(t_3)] e^{-\alpha(t-t_3)} \left\{ \cos \omega_1(t-t_3) + \left[\alpha + \frac{1}{R} \frac{V(t_3)}{E_2 - V(t_3)} \right] \sin \omega_1(t-t_3) \right\}, & (t \in (t_3 \sim t_4]) \end{cases} \quad (2)$$

文献[7]中对大变比脉冲升压变压器的寄生参数的估算,取 $C' = 1 \mu\text{F}$, $L_s = 1 \mu\text{H}$, $L_m = 1 \text{mH}$, $R' = 100 \Omega$,并代入上式,可得出 $V(t)$ 的波形,如图 7e 所示。其曲线特征与图 5 大致吻合,这说明所建立的理论模型可解释准谐振式触发的形成过程。

在实验中发现,当使用不同的脉冲变压器时,产生的振荡脉冲的周期也不同。这是由于选用的脉冲变压器是手工绕制而成的,无法保证工艺上的一致性,所以对于不同的脉冲变压器,其寄生参量各不相同,导致振荡脉冲周期也不相同。在实际应用中,可能会更换脉冲变压器,如果功率 MOSFET 管 Q_1 的驱动脉冲信号的频率固定不变的话,可能会导致触发脉冲与振荡脉冲不相重叠,没有达到利用振荡脉冲既提高腔体触发电压的脉冲峰值电压,又增大其脉冲宽度的目的。这时可通过改变图 3 中电位器 R_8 的阻值,调节触发频率,使触发脉冲与振荡脉冲相重叠,以达到准谐振状态。

4 结论

本预燃触发电路系统采用准谐振触发方式电离脉冲氙灯;并将耐压值很高的功率 MOSFET 管串联在氙灯阴极回路,用它解除氙灯电离状态。在预燃储能电

程,可得到图 7a ~ 图 7d 不同时刻的暂态微分方程^[8]:

$$\begin{cases} L_s C' V''(t) + \frac{L_s}{R'} V'(t) + V(t) = E_1, & (t \in [0 \sim t_1]) \\ L_m C' V''(t) + \frac{L_m}{R'} V'(t) + V(t) = 0, & (t \in [t_1 \sim t_2]) \\ L_m C' V''(t) + \frac{L_m}{R'} V'(t) + V(t) = 0, & (t \in [t_2 \sim t_3]) \\ L_s C' V''(t) + \frac{L_s}{R'} V'(t) + V(t) = E_2, & (t \in [t_3 \sim t_4]) \end{cases} \quad (1)$$

由初始状态 $V(0_-) = 0$, $V'(0_-) = 0$, 可求得 $V(t)$ 的解。

式中, $\alpha = \frac{1}{2R'C'}$ 为衰减系数; $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_s C'} - \alpha^2}$, $\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_m C'} - \alpha^2}$ 为衰减振荡角频率。并根据理想变压器变换原理,可知腔体与氙灯阴极间的电压 $V_L(t) = 100V(t)$ 。

参考文献

- [1] State Food and Drug Administration. YY0505-2005 / IEC 60601-2001 Medical Electrical Equipment [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 61 (in Chinese).
- [2] HUANG Zh Zh, LI J H. Modern medical laser [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1994: 25-67 (in Chinese).
- [3] MA Y W, CHENG Y Q. Laser devices [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994: 176-198 (in Chinese).
- [4] ZHAO N J, DENG G Q, ZHANG Y L. A new circuit of Ti:sapphire laser power supply [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 569-571 (in Chinese).
- [5] WANG J J, JI H B. Methods for solving EMI in TEA/CO₂ pulse laser rangefinder [J]. Modern Radar, 1999, 21(1): 94-97 (in Chinese).
- [6] WANG R H. Pulse transformer design [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-39 (in Chinese).
- [7] MATICK R E. Transmission line pulse transformers—theory and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56(1): 47-62.
- [8] CHENG Ch X. Circuit analysis basis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 99-159 (in Chinese).