

文章编号: 1001-4322(2009)11-1750-05

准分子激光全固态脉冲电源设计与实验研究*

游利兵, 梁 勤, 余吟山, 李 会, 王庆胜, 王效顺

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031)

摘 要: 针对脉冲能量 5~8 mJ 的 ArF 准分子激光器, 设计了基于可控硅开关结合三级磁脉冲压缩开关的全固态脉冲电源, 采用国产可控硅和磁开关材料, 获得了上升时间约 150 ns, 电压 10~14 kV, 传递能量 0.35~0.68 J 的激励脉冲, 并实现了对准分子激光器快放电激励。三级磁开关总效率 35%, 分析表明磁开关损耗较大主要原因为电容能量转移不充分、导线铜损及磁芯材料铁损较大, 并提出了相应改进办法。

关键词: 准分子激光; 全固态脉冲电源; 磁开关; 可控硅; 磁脉冲压缩

中图分类号: TN245; TN86 **文献标志码:** A

放电激励准分子激光器广泛应用于工业、医疗和科研等领域。器件一般采用闸流管释放高压储能电容器中的能量来产生快放电激励。该模式优点是结构紧凑, 主放电回路简单^[1-2]。在半导体光刻应用中, 准分子激光器重复频率达数 kHz, 闸流管的约 10⁹ 次脉冲放电寿命显得有限, 加之闸流管的残余振荡、预热启动及其老化过程中的自导通等缺点使上述快放电模式不能适应光刻等高重复频率应用的需求^[3-4]。

1951 年 Melville 首次提出用磁脉冲压缩技术来产生大功率脉冲^[5], 随后国外对磁开关应用进行了广泛的研究^[6-10]。国内对磁开关研究主要集中在高压除尘设备^[11-16]、加速器系统^[17-18]和延长激光器快放电中的闸流管寿命^[19]。在准分子激光技术中, 利用功率半导体开关结合磁脉冲压缩开关的方法产生高压快脉冲来替代闸流管, 能避免基于闸流管器件的缺点^[3-4]。半导体开关的寿命比闸流管高 3 个数量级以上^[20], 磁脉冲开关在长期高重复频率条件下性能无明显下降, 所以这一技术几乎不考虑寿命问题。此外, 磁开关回路放电不产生残余能量振荡, 使激光头寿命明显延长。

本文针对脉冲能量为 5~8 mJ 的 ArF 准分子激光器, 采用国产可控硅和磁开关材料, 设计了基于可控硅开关结合三级磁脉冲压缩开关的全固态脉冲电源, 获得了激励脉冲的上升时间约 150 ns, 电压 10~14 kV, 传递能量 0.35~0.68 J。

1 磁脉冲压缩原理

磁脉冲压缩开关实质上是一种非线性电感, 利用其可饱和特性来改变电路的工作状态。磁脉冲压缩开关磁芯一般采用磁滞回线高矩形比的软磁材料, 当前一般使用非晶材料和纳米晶材料。图 1 为典型高矩形比磁芯材料磁滞回线示意图。

图 2 为典型三级磁脉冲压缩电路示意图, MS₁, MS₂, MS₃ 为磁开关。当前端电容充电时, 磁开关可看作一未饱和大电感, 其值可表示为

$$L_{\text{unsat}} = \frac{\mu_0 \mu_{\text{unsat}} AN^2}{l} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_{unsat} 为磁开关未饱和时磁芯的相对磁导率; A 为磁芯有效截面积; N 为磁开关绕线匝数; l 为磁开关平均磁路长度。

磁开关的耐压时间与磁开关参数关系可表示为

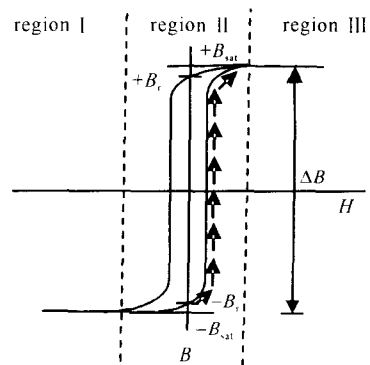


Fig. 1 B-H curve of typical magnetic core used in magnetic switch

图 1 典型磁开关磁芯材料磁滞回线

* 收稿日期: 2009-03-23; 修订日期: 2009-06-24

基金项目: 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金项目

作者简介: 游利兵(1981—), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事准分子激光技术研究; youlibing@126.com。

通信作者: 余吟山(1945—), 男, 上海市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电技术研究; ysyu@aiofm.ac.cn。

$$\int_0^{T_{sat}} V(t) dt = N\Delta BA \quad (2)$$

式(2)也被称为伏秒积分,表征磁开关的耐压特性。其中 T_{sat} 为磁开关耐压时间; $V(t)$ 为磁开关承受电压; ΔB 为磁芯材料磁通密度摆幅。

根据式(2)设计合适的磁开关参数,当电容充电达到最大值时,磁开关正好饱和,前端电容电荷通过饱和磁开关向后端电容转移,此时磁开关等效为一小电感,电感值表示为

$$L_{sat} = \mu_0 \mu_{sat} AN^2 / l \quad (3)$$

式中: μ_{sat} 为磁开关饱和时磁芯的相对磁导率,其大小与磁芯材料以及其饱和深度有关,一般磁芯深度饱和时在 3 左右^[18]。

由图 1 可以看出,磁芯工作在 II 区时 $B-H$ 曲线很陡,即 μ_{unsat} 很大;磁芯工作在 III 区时 $B-H$ 曲线斜率基本为零,即此时 μ_{sat} 很小。饱和前电感 L_{unsat} 大,使磁开关所在回路呈“关断”状态;饱和后 L_{sat} 小使该回路呈“开通”状态。设计磁开关饱和电感 $L_{n,sat}$ 远小于前级磁开关饱和电感 $L_{n-1,sat}$,而使电容值同前级相等或减小,则磁开关饱和后振荡周期减小,能量转移速度加快,实现脉冲宽度压缩。图 3 为典型三级磁脉冲压缩电容电压波形示意图^[21]。

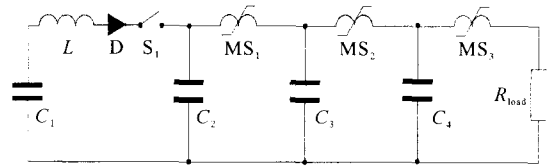


Fig. 2 Simplified circuit schematic of three-stage magnetic pulse compression

图 2 典型三级磁脉冲压缩电路

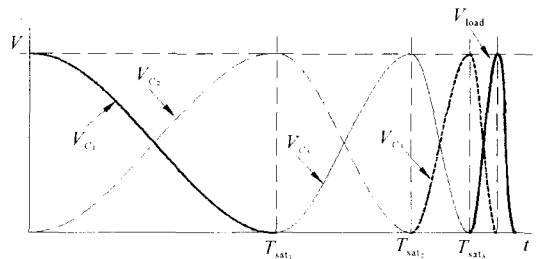


Fig. 3 Typical capacitor voltage waveforms of three-stage magnetic pulse compression circuit

图 3 典型三级磁脉冲压缩电路中电容电压波形

2 全固态脉冲电源设计

准分子激光工作特性决定泵浦系统必须具有高的功率密度和短的脉冲上升时间^[22]。KrF, ArF 等准分子激光泵浦峰值功率密度一般在 MW/cm^3 量级。实用器件中,基于闸流管的激励系统泵浦脉冲上升时间为 $100 \sim 150 \text{ ns}$ ^[19]。针对输出 $5 \sim 10 \text{ mJ}$ 小能量激光应用,设计全固态脉冲电源输出最大电压 14 kV ,最大脉冲能量 0.7 J ,脉冲上升时间小于 150 ns 。由于所购买可控硅电流上升率和额定电压指标限制,经计算初级脉冲上升最快只能做到约 $5 \mu\text{s}$ 。因此磁开关必须实现脉冲压缩约 25 倍以上,参照现有磁开关压缩水平,选择三级磁脉冲压缩。

图 4 为设计的三级磁脉冲压缩全固态脉冲电源示意图。 C_0, L, S_1, S_2, C_1 构成一电压可控谐振充电回路,

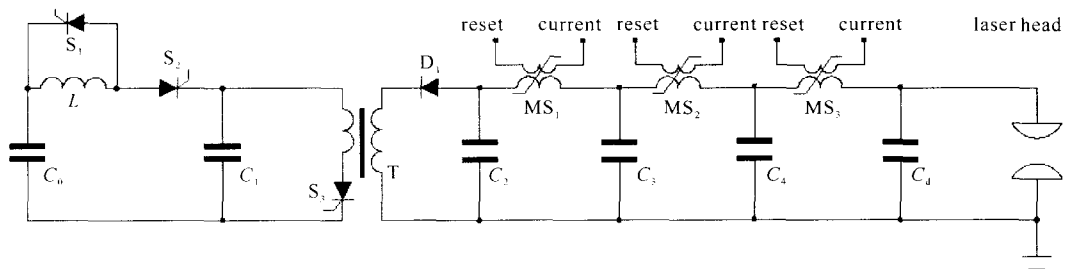


Fig. 4 Simplified circuit schematic of all solid state pulsed power supply

图 4 全固态脉冲电源主回路示意图

充电控制电路通过实时检测 C_1 电压值与设定值比较,当 C_1 达到设定值时,开关 S_1 导通,谐振回路对 C_1 充电结束。精确控制低压储能电容电压可调节最终输出脉冲能量。可控硅 S_3 导通, C_1 通过脉冲变压器对 C_2 充电,由于受开关管电流上升率限制,此能量转移过程一般在数 μs ,这里设计为 $5 \mu\text{s}$ 。在 C_2 电压逐渐升高过程中,磁开关 MS_1 饱和前近似认为断路,当 C_2 电压达到最高时, MS_1 正好饱和,此时 MS_1 近似为一空心小电感, C_2 快速向 C_3 放电。同理,经过 MS_2, MS_3 的压缩过程,电容 C_4 上的电压上升时间达到约 150 ns ,最后电极对工作气体

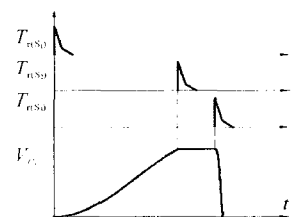


Fig. 5 Sequence diagram and voltage waveform on C_1

图 5 控制信号时序和 C_1 电压波形示意图

数十 ns 快速放电泵浦产生准分子激光。开关管控制信号时序与 C_1 电压波形对应关系如图 5 所示。磁开关参数计算主要依据公式(1)~(3)及电路振荡参数计算公式。

3 实验结果及讨论

按图 4 所示, C_1 为 2.2 μF 低压储能电容, T 为升压脉冲变压器, S_3 为作为主开关的可控硅, 其详细参数见表 1。 C_2, C_3, C_4 均为 8.16 nF, 30 kV 高压陶瓷电容, C_d 取 7.1 nF, 20 kV 高压陶瓷电容。磁开关 MS_1, MS_2, MS_3 采用国产铁基非晶和纳米晶材料, 详细设计参数见表 2。磁开关复位采用直流复位电路。

表 1 可控硅主要参数列表

Table 1 Parameters for silicon controlled rectifier

$V_{\text{DRM}}/$ V	$V_{\text{RRM}}/$ V	$I_{\text{T(AV)}}(T_{\text{hs}}55\text{ }^\circ\text{C})/$ A	$t_q(100\text{ }^\circ\text{C})/$ μs	$I_{\text{TSM}}(10\text{ ms})/$ kA	$(dV/dt)/$ $(\text{V} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$(di/dt)/$ $(\text{A} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$I_{\text{DRM}}/$ mA	$I_{\text{RRM}}/$ mA
2 500	2 500	2 500	35~70	27	500	600	200	200

表 2 磁开关设计参数列表

Table 2 Design parameters for magnetic switches

	material	B_s/T	$\Delta B/T$	total cross section/ cm^2	magnetic length/cm	number of turns
first stage	1K101	1.56	2.7	11.25	20.4	26
second stage	1K107	1.25	2.1	7.2	16.4	6
third stage	1K107	1.25	2.1	2.4	16.4	4

实验测得 C_2 输入电压 21 kV 时, 高压电容 C_2, C_3, C_4, C_d 电压波形见图 6, 测量采用 Tektronix 1000:1 高压探头 P6015A, 示波器 Tektronix TDS220。输出电压调节范围 10~14 kV, 能量 0.35~0.68 J。

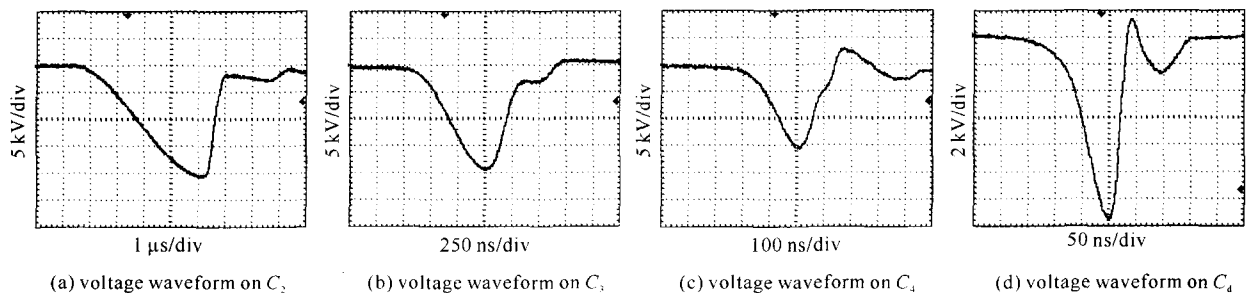


Fig. 6 Measured voltage waveforms on capacitors

图 6 实验测得电容器电压波形

使用本电源驱动自制 ArF 准分子激光头, 工作气压 0.6 MPa, 重复频率 10 Hz 运行时获得最大单脉冲 8.8 mJ 激光输出。

从测得电压波形可以看出, 电容 C_2, C_3, C_4, C_d 电压上升时间依次缩短, 分别为 5 μs , 750 ns, 250 ns, 最后一级放电电容 C_d 电压上升时间约 150 ns, 从 2 kV 电压快速上升到 13.5 kV 约 90 ns, 脉冲电压上升速度满足准分子泵浦要求。磁开关脉冲压缩倍数分别为 6.7, 3.0 和 1.7。三级磁开关能量转移效率总计约 35%, 单级磁开关平均效率约 70%。分析磁开关损耗主要由以下几部分组成: (1) 由图 6 可以看出, 磁开关饱和后前端电容能量没有完全转移到后端电容上, 表明磁开关结构参数需要优化提高转移效率。(2) 随着脉冲宽度的压缩, 磁开关导线趋肤效应明显, 损耗增大。(3) 国产非晶和纳米晶带材中间没有绝缘材料, 高频工作时涡流损耗较大。通过优化磁开关参数设计, 提高电容间转移效率; 选取合适的导线, 降低导线铜损; 软磁材料带层间添加绝缘材料, 减小磁芯涡流损失等措施有望提高电源整体效率。

4 结论

设计并制作了可控硅开关结合三级磁脉冲压缩开关的全固态脉冲电源, 获得了上升时间约 150 ns 的高压激励脉冲, 驱动 ArF 准分子激光头获得 8.8 mJ 激光输出。可见, 采用国产可控硅和磁开关材料制作的全固态脉冲电源可以满足小型准分子激光激励要求, 但磁开关效率偏低, 要制作上 kHz 高重复频率器件还需要提高电源整体效率。

参考文献:

- [1] 余吟山,方晓东,李会,等. 放电激励的 100 W XeCl 准分子激光器[J]. 量子电子学报, 1993, **13**(4):329-331. (Yu Yinshan, Fang Xiaodong, Li Hui, et al. Discharge-pumped 100 W XeCl excimer laser. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1993, **13**(4):329-331)
- [2] 余吟山,方晓东,周卫东. 大功率 XeCl 准分子激光器放电开关的实验研究[J]. 量子电子学报, 1997, **14**(1):48-51. (Yu Yinshan, Fang Xiaodong, Zhou Weidong. Experimental study on a discharging-switch system of a high-power XeCl excimer laser. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, **14**(1):48-51)
- [3] Partlo B, Sandstrom R, Fomenkov I, et al. Low cost of ownership KrF excimer light source using a novel pulse power and chamber configuration[C]//Proc of SPIE. 1995, **2440**:90-100.
- [4] Ness R, Melcher P, Ferguson G, et al. A decade of solid state pulsed power development at Cymer Inc[C]//2004 IEEE International Power Modulator Conference. 2004:228-233.
- [5] Melville W S. The use of saturable reactor as discharge devices for pulse generators[J]. *Proc IEE*, 1951, **98**:185-205.
- [6] Birx D L, Reginato L L, Schmidt J A. An investigation into the repetition rate limitations of magnetic switches[C]//Proc 15th Power Modulator Symp. 1982.
- [7] Smilanski I, Byron S R, Burkes T R. Electrical excitation of an XeCl laser using magnetic pulse compression[J]. *Appl Phys Lett*, 1982, **40**:547-548.
- [8] Shimada T, Obara M, Noguchi A. An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers[J]. *Rev Sci Instrum*, 1985, **56**:2018-2020.
- [9] Tanaka H, Obara M. Efficiency characterization of repetition-rated magnetic modulators for pumping TEA CO₂ lasers and KrF excimer lasers[C]//Digest of Technical Papers: The 6th IEEE Pulsed Power Conf. 1987:719-722.
- [10] Hatanaka H, Obarat M. High efficiency operation of the high-repetition-rate all-solid-state magnetic pulse compressor for KrF excimer lasers[J]. *Meas Sci Technol*, 1991, **2**:42-48.
- [11] 谢敏,丁伯南,刘云涛. 脱硫用重复频率脉冲电源设计[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(3):434-436. (Xie Min, Ding Bonan, Liu Yuntao, et al. Design of pulse voltage generator with repeat frequency for DeSO₂. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):434-436)
- [12] 苏建仓,刘国治,丁臻捷,等. 基于 SOS 的脉冲功率源技术新进展[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(8):1195-1200. (Su Jiancang, Liu Guozhi, Ding Zhenjie, et al. Experiment and applications of SOS-based pulsed power. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(8):1195-1200)
- [13] 陈洪斌,孟凡宝,张运俭,等. 利用 DBD 开关开展脉冲压缩技术研究[J]. 高电压技术, 2005, **31**(6):44-45. (Chen Hongbin, Meng Fanbao, Zhang Yunjian, et al. Research of the pulse compression technology using DBD switch. *High Voltage Engineering*, 2005, **31**(6):44-45)
- [14] 陈洪斌,孟凡宝,李爱萍,等. 基于 SOS 开关的脉冲源研制[J]. 高电压技术, 2005, **31**(9):56-58. (Chen Hongbin, Meng Fanbao, Li Aiping, et al. Development of SOS-based pulsed power source. *High Voltage Engineering*, 2005, **31**(9):56-58)
- [15] 张亚斌,赵君科,张之福,等. PPCP 用固态脉冲电源的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(4):697-700. (Zhang Yabin, Zhao Junke, Zhang Zhifu, et al. Experiment research of solid-state pulsed power generator for pulsed plasma induced chemical process. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):697-700)
- [16] 张东东,严萍,王珏. 磁脉冲压缩系统的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(3):497-500. (Zhang Dongdong, Yan Ping, Wang Jue. Simulation on a magnetic pulse compression system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3):497-500)
- [17] 丁伯南,戴光森,尹华碧. 磁脉冲压缩器用脉冲变压器的设计[J]. 强激光与粒子束, 1989, **1**(3):220-228. (Ding Bonan, Dai Guangsen, Yin Huabi. The design of pulse-transformer for magnetic pulse compression. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989, **1**(3):220-228)
- [18] 谢敏,马成刚,丁伯南,等. 用磁开关产生重复频率多路同步高压脉冲[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6):621-624. (Xie Min, Ma Chenggang, Ding Bonan, et al. High repetition rate and synchronous multi-pulse generated by magnetic switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):621-624)
- [19] 余吟山,方晓东,汪建业,等. 磁脉冲开关在准分子激光器中的应用[J]. 量子电子学报, 1995, **4**:372-376. (Yu Yinshan, Fang Xiaodong, Wang Jianye, et al. Magnetic pulse compressor used in excimer laser. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1995, **4**:372-376)
- [20] Choi Y W, Jeong I W, Rim G H, et al. Development of a magnetic pulse compression modulator for flue gas treatment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(5):1632-1636.
- [21] Barrett D M. Parameters which influence the performance of practical magnetic switches[C]//Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference. 1995, **2**:1154-1159.
- [22] 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, 1993:243. (Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufen, et al. Pulsed gas-discharge lasers. Beijing: Science Press, 1993:243)

Design and experimental study of all solid state pulse power module for excimer lasers

You Libing, Liang Xu, Yu Yinshan, Li Hui, Wang Qingsheng, Wang Xiaoshun

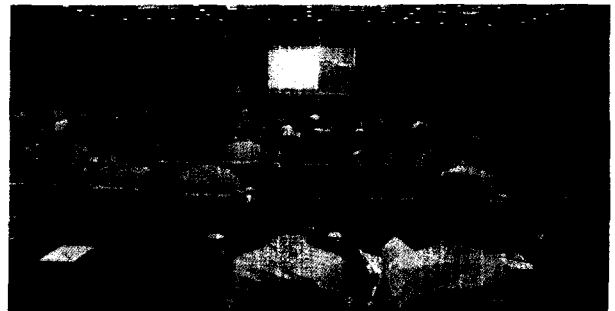
(The Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: A thyristor switched three-stage magnetic pulse compressor for ArF excimer laser was studied. This all solid state pulse power module can replace the commonly used thyratron switch. The thyristor and magnetic core used were both domestic products. The rise time of a high voltage pulse was compressed from 5 μ s to 150 ns. Output energy of 0.35 J to 0.68 J and voltage of 10 kV to 14 kV were obtained. The energy transfer efficiency of the three-stage magnetic pulse compressor was 35%. At last, the reason for low efficiency was discussed and several measures were provided to improve the energy transfer efficiency.

Key words: excimer laser; all solid state pulse power module; magnetic switch; thyristor; magnetic pulse compression

首届全国脉冲功率会议成功举办

首届全国脉冲功率会议于 2009 年 9 月 21 日至 25 日在安徽芜湖成功举办。此次会议是中国核学会脉冲功率技术及其应用分会成立后举办的首次全国性学术交流会议,会议由脉冲功率技术及其应用分会主办,安徽芜湖国睿兆伏电子股份有限公司承办,中物院流体物理研究所、中物院科协、四川省电子学会高能电子学专业委员会等单位协办。



在大会开幕式上,学会理事长邓建军研究员致开幕辞,并向参会代表介绍了学会的建设与本次会议的筹备情况;学会秘书长石金水研究员宣读了中国核学会加速器分会和中物院科协致本次会议的贺信;彭先觉院士代表核学会致辞。大会开始后,彭先觉院士、中物院一所邓建军研究员、西北核技术研究所曾正中研究员、中物院十所常安碧研究员和国防科大刘金亮教授分别做了特邀报告。在随后的会议中,共有 100 余位代表进行了口头报告,60 余位代表准备了张贴报告。经过脉冲功率及其应用分会理事会各位专家的评审,共有 6 篇论文被评为优秀论文,王勐获得优秀论文一等奖,邵涛、宋玮、李晶、黄子平四人获得优秀论文二等奖,廖树清获得青年论文优秀奖。

本次会议共收录文章 204 篇,研究范围包括了脉冲功率技术及其应用、强流脉冲加速技术、高功率微波技术、相关数值模拟研究等多个领域。共有来自中国工程物理研究院、西北核技术研究所、中科院电工所和电子所、中国原子能科学研究院、国防科技大学、清华大学、西安交通大学、成都电子科技大学、西南交通大学、华中科技大学、复旦大学等多家科研教育单位,及国睿兆伏电子、力源电子、天润中电、华耀电子、正阳光电、中电科技集团 23 所、西南电工、锡脉电器、微讯电子等以脉冲功率设备研发为主的相关企业的 200 余位代表参加了会议交流,其中有经验丰富的研究员、教授,有年富力强的中青年专家和相关领域的企业家,也有刚参加工作的青年科研人员和在读的研究生,大家互相展示自己近年来的研究成果,交流各自的经验和心得,丰富了知识,开阔了眼界。

本次大会的成功举办,促进了脉冲功率技术研究工作者之间的学术交流,增进了该领域内各科研教育及生产单位之间的相互了解,也为以后的会议积累了经验。

(王涛)