

高功率脉冲技术的发展及应用研究

刘锡三

(应用电子学研究所 成都 610003)

摘要 本文简要介绍了中国工程物理研究院三十多年来在高功率脉冲技术研究方面所取得的重大进展与应用成果.同时,也提出了今后开展的重要研究课题.高功率脉冲技术是当前国际上比较活跃的一门前沿学科,它是高新技术研究的重要技术基础,有着广阔的发展前景.

关键词 脉冲功率, 强流电子束, 闪光 X 射线照像, 抗核加固, 自由电子激光, 高功率微波.

1 引言

高功率脉冲技术亦称高功率粒子束技术,是获得强流相对性电子束或离子束的重要手段.一般系指达到下述水平的粒子束(包括电子束和离子束)而言的:能量 $0.5\sim 1.5$ MeV;束流 $1\text{kA}\sim 10\text{MA}$;脉宽 $20\sim 100\text{ns}$;功率 $10^{11}\sim 10^{14}\text{W}$.这是应国防科研的需求而产生,并随国防科研的发展而迅速发展起来的一门新学科.

60年代初期,英国原子武器研究中心的 J. C. Martin 和他的小组首先建议运用脉冲功率技术产生高功率电子束,并且成功地将传输线技术应用于脉冲功率研究,从而开创了脉冲功率技术的新纪元.从那时起,高功率电子束作为闪光 X 射线机和核爆模拟源,得到了迅速的发展.数十年间,美、英、苏、日及欧洲许多国家的主要实验室都先后建造了为数众多的这类装置.

我院的脉冲功率技术研究是开始于 60 年代初研制脉冲 X 射线机技术,60 年代末进行了纳秒脉冲高质技术研究,70 年代才转向高功率脉冲电子束加速器的研制,80 年代初建成了我国最大的强流脉冲电子束加速器闪光-I.90 年代初又研制成 10MeV 感应直线电子加速器.

高功率粒子束目前已应用到许多重要的科学研究领域,成为有力的研究工具.例如,高能闪光 X 射线照像、核爆模拟器、电磁脉冲研究、惯性约束聚变、自由电子激光、高功率

微波、离子集体加速、强脉冲中子源及等离子体加热等许多方面,形成了许多新兴学科如抗核辐射电子学、相对论电子学和高亮度物理学等.

国际上,每两年召开一次脉冲功率会议和高功率粒子束会议,交叉进行,平均每年都有国际讨论会.

高功率粒子束是当前一门比较活跃的前沿科学技术,它是高新技术研究的重要技术基础,有着广阔的发展前景.

2 高功率脉冲技术的发展

脉冲功率技术在 CAEP 已有三十年的发展历史,它曾在爆轰物理学和 γ 射线辐照效应研究中发挥重要的作用.近几年来,它又在自由电子激光和高功率微波等高新技术研究中取得开拓性的重大研究成果.我们研制成功了五种类型的机器,研制过程中得到了国内许多单位的协作,取得了不少成果,已在国内得到推广应用.几种典型的高功率粒子束加速器的技术参数见表 1

脉冲功率的发展,可分为下列四个阶段.

1) 微秒级 Marx 发生器

采用 Marx 发生器电路,每级电容 $0.06\mu\text{F}$,充电电压 100kV ,共有五极,定型后命名为 6CYF500-0.06/5 型冲击电压发生器,火花球隙暴露在大气中.使用时,4 台叠加串接,标称电压 2MV ,脉宽微秒量级.

2) 纳秒带状线 Marx 发生器

主要储能元件是高介电常数($\epsilon=900$)的钛酸钡平板形陶瓷电容器,每片电容量8000PF,耐压25kV,发生器由150级组成,

输出电压1MV,脉宽40ns,火花球隙及 Marx 蕊子全部放在充5个大气压氮气的钢筒内.

3) Blumlein 传输线型纳秒脉冲发生器

表1 几种典型的脉冲功率装置

机器	种类	电压 (MV)	电流 (kA)	脉宽 (ns)	剂量 (1m处)	焦点 (mm)	建成时间 (a)	备注
X-I	6CYF型 Marx	1.6*	5.2*	400	0.4	6	1964	4套联合运行
X-I A	带状线 Marx	1	5	40	0.4	10	1972	工业生产
X-I	水介质 Blumlein 线	0.8	30	50	0.8	6	1977	3套联合运行
X-I A	油介质 Blumlein 线	0.75	18	40	0.6	6	1974	束物理研究 Raman FEL
闪光-I	油介质 Blumlein 线	8	100	80	200	6~8	1983	辅照和闪光照像两用
SG-1	感应直线	3.3	2	90	/	/	1990	FEL 放大器
LIA-10	感应直线	10	2.5	90	90	2~3	1993	闪光照像

* 标称电压、二极管电压 <500 kV,二极管电流中包括很大成份弧电流.

在 Marx 发生器和 X 射线二极管之间加接一段双同轴传输线(Blumlein 线),可获得高功率的纳秒脉冲输出.传输线的设计选用变压器油或去离子水作为介质,这是获得强流电子束的主要技术,闪光-I 充变压器油500t,输出3MV,100kA、80ns的电子束.

4) 感应直线加速器的加速组元

感应加速组元的变压器蕊子由铁氧体磁环构成,利用 Marx-Blumlein 型的纳秒脉冲高压对变压器初极激励,在每个加速组元间隙上可获得250~350kV的纳秒高压;加速通过间隙的电子束,可实现多个间隙加速,把电子束加速到更高能量.目前,10MeV,2kA的直线感应加速器已成功地投入运行.

在发展整机研制的同时,作为高功率脉冲技术的基础研究,如火花开关技术、绝缘技术、二极管物理和束诊断技术等得到相应的发展.

3 应用概况

3.1 抗核加固研究

高功率电子束应用于加固武器系统和部

件的核辐射试验,以提高武器的生存能力.高功率电子束加速器可提供模拟核爆炸的瞬发 γ 射线或 X 射线源,闪光-I 在1m处的 γ 照射量为1000R($1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$).窗口 γ 照射率为 $4 \times 10^{11}R/S$ ($1R/S=2.58 \times 10^{-4}A/kg$),均匀照射面积 $15cm \times 15cm$,它为在实验室内进行模拟的核辐射损伤机制研究和核加固技术研究提供了良好条件,主要参数也易于控制,又能进行单个效应的多次重复试验,费用低廉.

3.2 闪光 X 射线照像

闪光 X 射线照像方法是爆轰物理的重要测试手段,对于掌握爆轰规律,验证计算程序,寻找最佳测试方案提供了依据.我院的爆轰物理研究大大促进了闪光 X 射线机技术的发展,同时,利用先进脉冲功率技术研制的闪光 X 射线机也使爆轰物理研究向着更深层次发展.

3.3 自由电子激光

自由电子激光由于功率高、效率高、波长短且可调、光束质量好等许多独特优点,以及由于 SDI 计划的促进及它在生物、医学、材料

科学中的多种应用,在国际上受到很大重视.自由电子激光研究要求提供低发射度和低能散度的高质电子束,这正是我院强流电子束的研究方向.我们利用脉冲线加速器提供的 400~560kV、1kA、40ns 的强流电子束,进行了有引导磁场的 Raman 型自由电子激光实验,采用双绕螺线管摇摆器,获得 8mm 波 3MW 的功率输出,继而进一步进行了引导磁场的自由电子激光实验观测到了饱和现象,输出功率为 7.5MW,这使我国的自由电子激光起步研究迈出了可喜的一步.

利用感应直线加速器产生的 3.3MeV, 1.5kA, 90ns 电子束,采取 4m 长的新型双向聚焦的线极化电磁铁摇摆器,于 94 年 9 月成功地进行了自由电子激光放大器实验,获得 34.6GHz, 140MW 的峰值功率.这台大型实验装置的建成,对于研究自由电子激光的工作机理,掌握自由电子激光的实验技术均具有重要的意义.

3.4 高功率微波

利用强流电子束产生高功率微波的实验,具有很大的吸引力.频率范围 1~100GHz,功率高达几百 MW 到几十 GW 的微波源,不仅在军事上,而且在民用方面都具有十分重要的意义.

采用虚阴极振荡原理产生强微波辐射是一个切实可行的方案,我们降低闪光-I 的二极管阻抗,使闪光-I 输出 5MW, 120kA 的电流,选用半径 21cm 的漂移管,得到 1.85GHz 和 10GW 的高功率微波输出.在此基础上,结合进行了相对论速调管、相对论磁控管和返波管等相对论性微波器件的研究,用以推动我院高功率微波技术的发展.

4 展 望

冷战结束以后,高功率脉冲技术发展的方向如何?在新的形势下,脉冲功率技术遇到了新的挑战,无论是美国或是我们都面临着军民结合的问题.同时,这也是一次机遇,三

十多年的技术发展已经奠定了将高功率脉冲技术转向民用的技术基础.民用是一个巨大的市场,而市场的推动又必将给脉冲功率的发展带来新的生机.

4.1 积极开拓应用新领域

一些重要的发展方向有:

(1)高分辨闪光 X 射线照机 束能量 16~20MeV,束流发射度 $< 0.1\pi\text{cm}\cdot\text{rad}$,焦点 1mm 量级.

(2)GW 级高功率微波研究 束能量 500kV~1MV,电流 2~10kA,脉宽 50~100ns,重复频率 10~100Hz.

(3)脉冲电晕放电用于燃煤烟气治理研究 脉冲电压 200~500kV,平均放电功率 20~300kW.

(4)新型的工业辐射源 利用高功率脉冲技术获能量 1~2MeV,平均功率 10~50kW 的强流电子束,可望成为价格便宜的工业辐照源.

它在辐射加工,食品保鲜,药品消毒中都有重要应用.过去高功率脉冲装置主要为国防科研服务,大都单次脉冲或几秒一个脉冲工作,新的工业应用和高功率微波研究迫切要求脉冲功率装置高重复频率工作,以获得高平均功率输出.重复频率运行以后,开关技术、绝缘技术、二极管物理及束传输物理等方面都会带来许多物理与工程方面的问题,如元件的老化、开关寿命、阴极和阳极的寿命等.这些问题的解决,必须使脉冲功率技术开创第二个里程碑.

4.2 若干重要的前沿课题

- (1)高亮度电子源.
- (2)高重复频率开关技术.
- (3)新型绝缘材料研究.
- (4)重复频率二极管物理.
- (5)束传输物理.
- (6)束流诊断.

高功率脉冲技术是一项跨世纪的科学技术,90 年代中,在军民两用的推动下,一定会结出丰硕的成果. (下转 10 页)

达国际水平. 由中国科技大学近代物理系研制的中能高分辨电子能损谱仪和(e, 2e)电子动量谱仪, 是世界同类装置中最好的之一, 它们均用电子作探针深入物质结构的原子结构层次进行研究.

参 考 文 献

- 1 Feynman R P, et al. Phys. Rev., 1949, 75 : 1561
- 2 Cowan R D, et al. phys. Rev., 1957, 105 : 144
- 3 Carson T R, et al. Montly Notices Roy. Astron. Soc., 1968, 140 : 483
- 4 Zink J W. Phys. Rev., 1968, 176 : 279
- 5 Rozsnyai B F. Phys. Rev., 1972, A5 : 1137
- 6 Sun Yongsheng, et al. JQSRT, 1994, 51(1~2) : 411
- 7 Desilva Alan W, et al. Phys. Rve., 1994, E49 : 4448
- 8 Benage J F, et al. Phys. Rev., 1994, E49 : 4391
- 9 Springer P T, et al. JQSRT, 1994, 51 : 371
- 10 Erskine D, et al. JQSRT, 1994, 51 : 97

Survey of Atomic Physics Researches in Hot Plasmas and Associated Research for Atomic and Molecular Data

Sun Yongsheng Zheng Shaotang Du Xiangwan

(*Institute of Applied Physics and computational Mathematics, Beijing 100088*)

Abstract The uses, status and tendency of the two essential atomic models were presented emphatically. They are the average atom (AA) model and the detailed configuration accounting (DCA) model. Concerning atomic processes in hot plasmas, the electron-ion collision and the dielectronic recombination were introduced especially. However, the experimental status were less presented. The general situation were presented in this paper.

Key Words atomic model, atomic physics process, associated research.

(上接 18 页)

Development of High Pulsed Power Technology and Its Applications

Liu Xisan

(*Institute of Applied Electronics, Chengdu 610003*)

Abstract In this paper the research progress of high pulsed power technology and its applications in the past 30 years in CAEP have been briefly introduced. Meanwhile, related important topics of future development are also given. High pulsed power is a more dynamic science and technology at the front position in the world. It has a wide great future.

Key Words pulsed power technology, intense electron beam, flash X-ray radiography, nuclear hardening, free electron laser, high power microwave.