

两种典型结构强流自箍缩二极管技术研究

杨海亮¹, 邱爱慈¹, 孙剑锋¹, 高屹^{1,2}, 苏兆锋¹, 李静雅¹,
孙凤举¹, 梁天学¹, 尹佳辉¹, 丛培天¹, 黄建军¹, 任书庆¹

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

[摘要] 主要介绍了箍缩聚焦二极管和自箍缩离子束二极管的研究进展。重点介绍了近几年发展的阳极杆箍缩聚焦二极管的理论模拟和实验结果,在“闪光二号”加速器和2 MV 脉冲功率驱动源上进行了阳极杆箍缩二极管实验,二极管输出电压1.8~2.1 MV,电流40~60 kA,脉宽(FWHM)50~60 ns,1 m处的脉冲X剂量约20~30 mGy,焦斑直径约1 mm,X射线最高能量1.8 MeV。在“闪光二号”加速器上开展了高功率离子束的产生和应用研究,给出了自箍缩反射离子束二极管的结构和工作原理,实验获得的离子束峰值电流~160 kA,离子的峰值能量~500 keV,开展了利用高功率质子束轰击¹⁹F靶产生6~7 MeV 准单能脉冲 γ 射线,模拟X射线热—力学效应等应用基础研究。

[关键词] 阳极杆箍缩二极管;离子束二极管;X射线;高功率离子束;箍缩;聚焦

[中图分类号] TL501;TL58;TL506;O571;TL81 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0070-09

1 前言

强流自箍缩二极管主要用于产生强流粒子束,包括电子束、质子束和重离子束等,通过韧致辐射或核反应又可以产生软X射线、硬X射线、脉冲 γ 射线、中子等。由于二极管中的束流很强,所产生的磁场导致二极管中束流自身发生强箍缩,使这一类型的二极管所涉及的物理问题相当复杂,主要包括极强的空间电荷效应、自磁场产生的箍缩效应、发射度增长效应、尾场效应、能散效应等,尤为复杂的是强流粒子束从产生到应用,始终伴随着与等离子体的相互作用,这使得其产生、传输、诊断和应用研究都面临着很大难度,需要研究的内容复杂,需要解决的难题相当多。

强流自箍缩二极管结构复杂、种类繁多、应用广泛。特别是近几年,利用阳极杆箍缩二极管产生亚毫米焦点的强聚焦的高能脉冲X射线,利用强流脉冲离子束模拟材料的软X射线热力学效应与结构

响应、产生高能量的单能脉冲 γ 射线(6.129 MeV, 16.7 MeV)等新的研究方向都取得较大进展,使得阳极杆箍缩二极管和自箍缩反射离子束二极管这两种具有典型结构的强流自箍缩二极管成为研究的热点。

随着研究的不断深入,强流二极管所产生的强流粒子束在材料性能研究、材料改性与表面工程、纳米薄膜等新材料制备领域已成为一种先进的技术手段,在集成电路光刻等领域也已发挥了显著作用。这些新的应用领域更有效地促进了强流粒子束二极管技术的快速发展,并不断培育出新的创新点。

文章重点介绍近几年西北核技术研究所阳极杆箍缩二极管和自箍缩反射离子束二极管这两种具有典型结构的强流自箍缩二极管方面的研究进展。

2 阳极杆箍缩聚焦二极管

近年来,随着脉冲功率技术中感应电压叠加器

[收稿日期] 2008-12-21

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(10775112,19975037);国防预研基金资助项目

[作者简介] 杨海亮(1968-),男,山东诸城市人,西北核技术研究所副研究员,研究方向为核技术及应用;E-mail:765258@gmail.com

(inductive voltage adder, IVA)、真空磁绝缘传输线 (magnetic insulation transmission line, MITL) 和阳极杆箍缩聚焦二极管 (rod pinch diode, RPD, 也简称阳极杆箍缩二极管) 单元技术的发展和结合, 使基于 IVA, MITL 和 RPD 技术的新型闪光照相技术获得突破性进展^[1-4]。这类装置结构简单、体积较小、运行操作比较方便、造价低廉, 对环境要求低。显示了基于 IVA, MITL 和 RPD 技术的新型加速器的良好应用前景^[5], 其中 RPD 二极管是其关键核心技术。

RPD 二极管利用薄环形阴极围绕细直径阳极杆, 并且阳极杆逐渐变细延伸, 超出阴极平面一段距离。阴极径向发射的电子在束流自磁场作用下箍缩, 向锥体下游聚焦, 轰击高原子序数材料的阳极尖端, 产生韧致辐射 X 射线, 焦斑直径约为 1 mm。

理论计算了所设计的阳极杆箍缩聚焦二极管的电场分布, 图 1 是二极管电压等势面分布图, 图 2 是电场矢量图, 图 3 是电场强度分布图, 为尽可能保证外筒同轴段和过渡段表面不发射电子, 要求其表面的电场强度 $< 100 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$, 从计算结果看, 这一条件能够满足, 因此在实验中阳极半球头和铝阳极支撑杆表面未发现被电子轰击的痕迹。

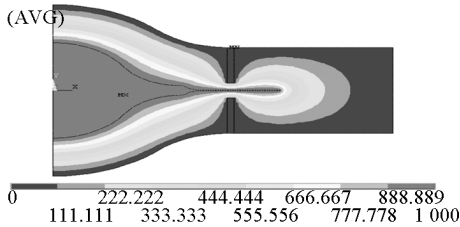


图 1 阳极杆箍缩聚焦二极管电压等势面分布

Fig. 1 Equipotential plane of electric field in rod-pinch diode

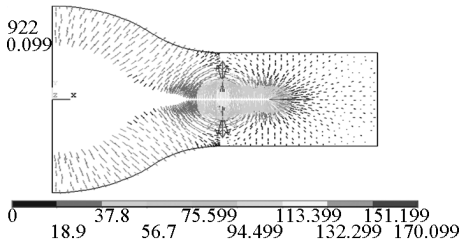


图 2 阳极杆箍缩聚焦二极管电场矢量

Fig. 2 Electric field vector in rod-pinch diode

采用 PIC 方法理论模拟了阳极杆箍缩聚焦二极管的电子束发射和箍缩聚焦行为 (见图 4), 从模拟结果可以看出, 除了部分电子在环状阴极处掠射阳极杆之外, 大部分电子都箍缩聚焦至阳极杆尖端。

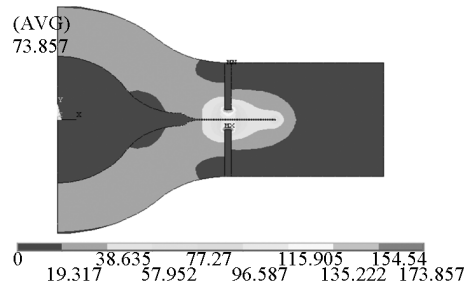


图 3 阳极杆箍缩聚焦二极管电场强度分布

Fig. 3 Distribution of electric field in rod-pinch diode

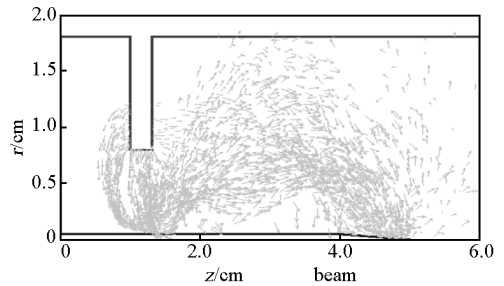


图 4 理论模拟的二极管电子束流箍缩聚焦情形

Fig. 4 Scheme of pinched electron in rod-pinch diode

根据以上理论计算和数值模拟结果, 选取合适的阳极杆箍缩二极管构型, 在“闪光二号”加速器和 2 MV 脉冲功率驱动源上, 进行了实验研究^[6], 图 5 是实验中所采用的二极管结构示意图。图 6 是实验结束后, 未取出环状阴极, 爆裂后的钨针阳极尚未从铝阳极支撑杆上取出时的照片, 从图中可以看出, 实验后钨针阳极末端爆裂严重, 阴极处爆裂断开, 说明电子束轰击钨针阳极, 并且在其上沉积的能量足够大, 导致钨针阳极爆裂。图 7 是爆裂后的钨针阳极及铝阳极支撑杆, 从图中可以看出, 虽然钨针阳极被箍缩电子束轰击, 但铝阳极支撑杆却未受到电子束轰击, 说明电子束由于自箍缩而顺着钨针阳极运动到尖端, 而几乎没有向后运动的电子。

图 8 是爆裂后的钨针与原钨针的对比, 从图中可以明显看出, 电子束轰击钨针阳极最严重的部位是阳极尖端和环状阴极处所对应的钨针阳极, 导致这两个部位爆裂, 环状阴极前端 (除尖端外) 对应的钨针阳极烧蚀则很弱, 而环状阴极后端对应的钨针阳极几乎无烧蚀, 这与模拟计算结果是一致的, 表明除了部分电子在环状阴极处掠射阳极杆之外, 大部分电子都箍缩聚焦至阳极杆尖端, 说明该二极管发生了强箍缩聚焦, 能够产生强聚焦 X 射线。

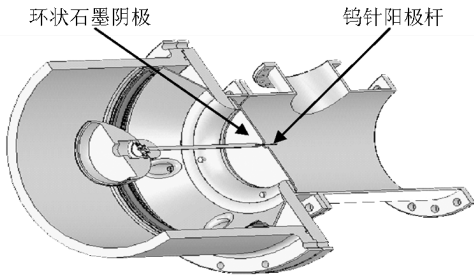


图5 阳极杆箍缩聚焦二极管结构示意图

Fig. 5 Schematic of rod - pinch diode

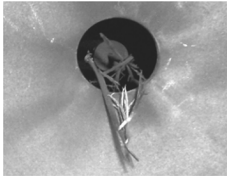


图6 爆裂后的钨针阳极

Fig. 6 Tungsten rod after experiment

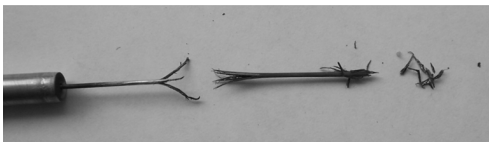


图7 爆裂后的钨针阳极及铝阳极支撑杆

Fig. 7 Tungsten rod and aluminum stand bar



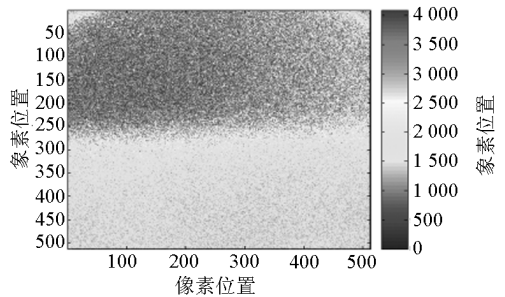
图8 爆裂后的钨针与原钨针对比

Fig. 8 Comparison of tungsten rod before and after explosion

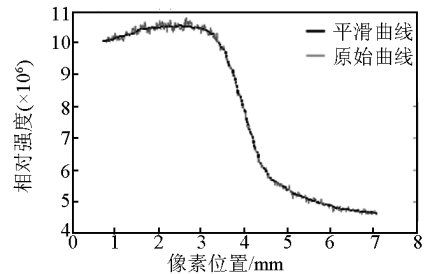
采用半影成像技术测量 X 射线的焦斑直径,测量结果见图 9, X 射线焦斑直径为 (0.88 ± 0.15) mm (线扩散函数的半高宽 $FWHM_{LSF}$)。

利用阳极杆箍缩聚焦二极管所产生的韧致辐射 X 射线对铅和铁台阶、米尺等实物进行成像实验。图 10 中, (a) 为铅和铁台阶, (b) 为台阶所成图像, (c) 为钢卷尺所成图像。由此可知, X 射线能够穿透厚度分别为 5 mm 和 15 mm 的铅和铁, 成像效果良好; 对于钢卷尺等复杂结构, 有较好的分辨率(亚毫米)。

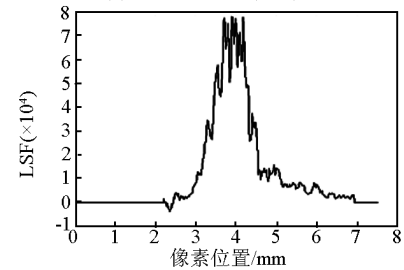
新研制了 2 MV 感应电压叠加器, 进行了阳极杆箍缩二极管的实验研究。Marx 充电电压分别为正负 20, 25, 30, 35 kV, 改变阴阳极结构、环状阴极直径、阳极杆及其支撑杆的直径和长度等诸多参数, 相应调节脉冲功率源开关的工作状态和参数, 以提高 X 射线剂量、能量和减小焦斑尺寸。不同 Marx 充电电压下的 RPD 典型实验结果见表 1, RPD 二极管电压、电流与 X 射线典型波形见图 11。在 Marx 发生器充电电压为 ± 35 kV 时, 二极管输出电压 1.8 ~ 2.1 MV, 电流 40 ~ 60 kA, 脉宽 (FWHM) 50 ~ 60 ns, 1 m 处的脉冲 X 剂量约 20 ~ 30 mGy, 焦斑直径约 1 mm。



(a) 实测图像



(b) 边沿扩散函数(ESF)曲线



(c) 线扩散函数(LSF)曲线, 表示焦斑尺寸

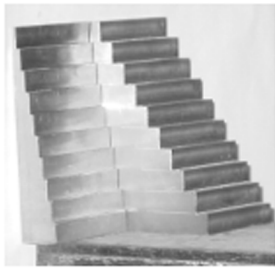
图9 半影成像技术测量焦斑直径所记录的图像及处理结果

Fig. 9 Image and treating results of spot diameter measurement

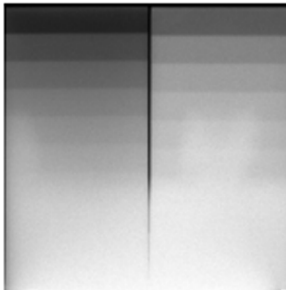
表 1 阳极杆箍缩二极管实验结果

Table 1 Experimental results of RPD

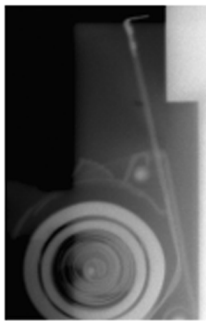
炮号	Marx 发生器充电电压 /kV	阳极直径/mm	1 m 处剂量/mGy	焦斑直径/mm	X-射线脉冲半高宽/ns	二极管电流 /kA
042	35	1.2	28.8		45.8	53.1
036	35	1.2	27.5	0.95	41.6	52.7
035	35	1.2	25.4	1.01	36.8	57.0
026	30	1.2	20.5		49.0	45.1
009	25	1.2	11			35.6
008	20	1.2	6			29



(a)铅和铁台阶实物照片



(b)铅和铁台阶闪光照相结果



(c)钢卷尺闪光照相结果

图 10 阳极杆箍缩聚焦二极管所产生的 X 射线穿透率照相实验初步结果
Fig. 10 Preliminary experimental results of RPD X-ray radiography

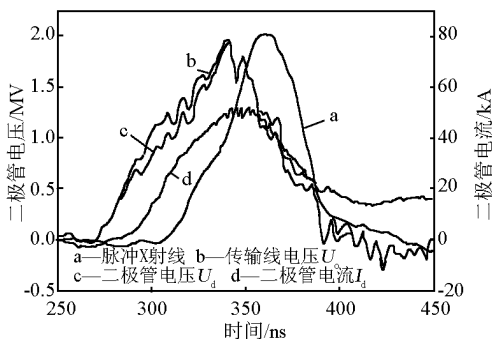


图 11 阳极杆箍缩二极管电压电流与 X 射线波形
Fig. 11 Voltage, current and X-ray pulse of RPD driven by 2 mV pulsed power generator

3 自箍缩离子束二极管

3.1 “闪光二号”加速器产生的高功率离子束

“闪光二号”加速器是国内电子束流强度最大的一台低阻抗强流脉冲电子束加速器,通过调整极性,使其在正极性状态下运行,利用新设计的自箍缩离子束二极管,可以产生高功率离子束^[7,8]。图 12 是模拟的二极管阴极爆炸电子发射、束流箍缩、虚阴极形成、电子束流反射以及离子束的加速和引出过程。表 2 列出了二极管参数以及所产生的总束流的参数,二极管的束流强度峰值 480 kA,峰值功率可达 206 GW。根据实测的间隙电压计算得到了二极管的总束流强度和产生的高功率离子束的束流强度(见图 13),图中也给出了实测的二极管总束流强度和利用偏压法拉第筒阵列测量的离子束流强度,从图中可以看出,理论计算结果与实验测量值基本相符。图 14 是实验前后的阴阳极变化情况,图 15 是不同二极管纵横比情况下的阳极膜汽化情形。

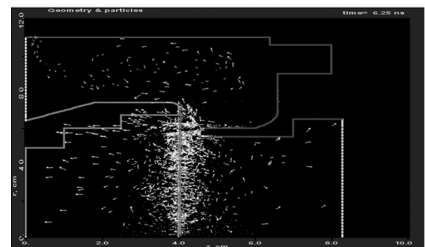


图 12 理论模拟的二极管束流箍缩、虚阴极形成、电子束流反射以及离子束的加速过程

Fig. 12 Simulation of current pinching, virtual cathode forming, electron reflecting and ion accelerating

图 17 是采用 PIN 半导体探测器测量的质子束传输不同距离轰击靶产生的准单能脉冲 γ 射线信号。图 18 是采用 ST401 塑料闪烁体配光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 测得的质子束传输不同距离轰击靶产生的准单能脉冲 γ 射线。

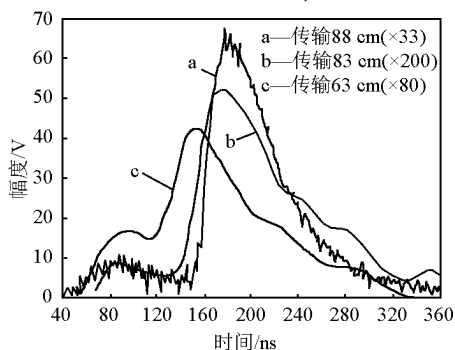


图 17 PIN 探测器测量质子束传输不同距离轰击靶产生的准单能脉冲 γ 射线

Fig. 17 Measured quasi-monoenergetic pulsed γ -rays by the PIN detector, with the proton beams striking target at various transmission distance

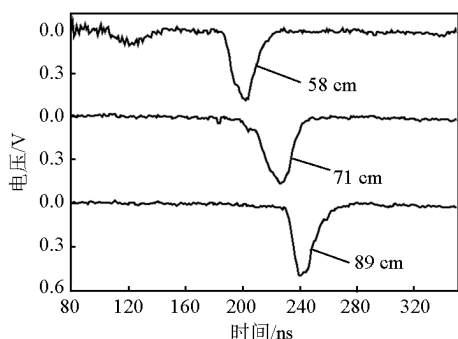


图 18 ST401 塑料闪烁体配 PMT 测量质子传输不同距离轰击靶产生的准单能脉冲 γ 射线

Fig. 18 Measured quasi-monoenergetic pulsed γ -rays by the PIN detector, with the proton beams striking target at various transmission distances

3.3 模拟材料的软 X 射线热—力学效应

由于离子束(0.5~1 MeV)与 1 keV 黑体辐射 X 射线的能量沉积范围基本一致,因此,利用高功率离子束模拟软 X 射线的热—力学效应是一种有效手段^[12]。

利用目前“闪光二号”加速器所产生的高功率离子束辐照镀 Cr 的不锈钢样品,可使所镀的 Cr 薄层被完全剥离掉(见图 19),表明高功率离子束已使薄层材料产生了明显的热—力学效应。

铜和不锈钢等金属样品被辐照后,样品表面有明显的束斑痕迹和熔融层(见图 20),样品表面层所

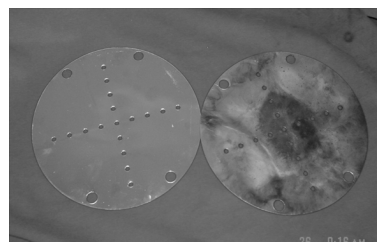


图 19 经高功率离子束辐照前(左侧)后(右侧)的镀 Cr 不锈钢样品对比(辐照后所镀 Cr 层被完全剥离掉)
Fig. 19 The comparison chromium plating samples irradiated(right) by HPIB on FLASH II accelerator with the samples not irradiated(left) by HPIB (left: not irradiated; right: chrome plated surface was stripped by HPIB)

沉积的能量约为 $10 \sim 20 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,在铝样品中的沉积深度约为 $5 \mu\text{m}$,表面层汽化区的厚度范围 $> 3 \mu\text{m}$,则汽化损失掉的质量约为几十毫克,而利用精密天平测量辐照后样品的质量损失也约为几十毫克,即由于样品表面层的汽化而飞溅掉的样品质量约为几十毫克。

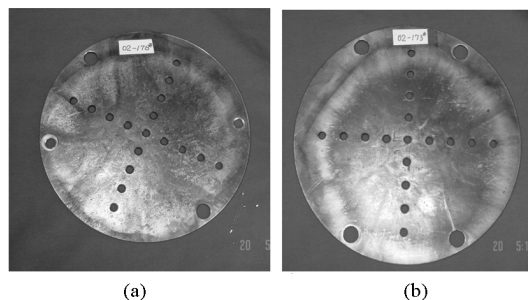


图 20 经高功率离子束辐照后的铜样品的汽化和熔融痕迹

Fig. 20 The evaporating and melting trace of copper samples irradiated by HPIB on FLASH II accelerator

材料表面熔融、汽化和电离所形成稠密等离子体向外膨胀喷射,产生喷射冲量,并同时存在热击波,所产生的喷射冲量和热击波等使样品产生了严重的形变,在高功率离子束束流直径为 75 mm 的情况下,Al 样品靶($\phi 95 \text{ mm}$,厚 1 mm)形成明显的凹坑,深度达 6 mm(见图 21)。

利用“闪光二号”加速器产生的高功率离子束进行了模拟材料 X 射线热—力学效应的初步实验,实测的 5 mm 厚 LY12 硬铝背部的应力波峰值达 35 MPa,估计 1 mm 厚的硬铝背部的应力波峰值 $> 200 \text{ MPa}$ 。

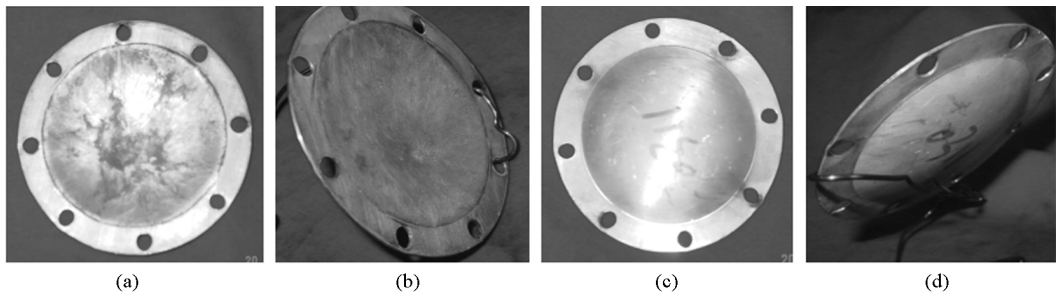


图 21 高功率离子束辐照后的薄铝样品(形变达 6 mm)

Fig. 21 The 6 mm deformation of thin aluminum samples irradiated by HPIB on FLASH II accelerator

3.4 金属表面改性研究

HPIB 可以改变材料的表面结构或成分,获得非晶、纳米晶和其他常规方法不能达到的表层成分、组织结构、强韧性、高耐磨等其他特殊物理性能的表面层,因此, HPIB 正在发展成为新的材料表面改性技术^[13-15]。

在“闪光二号”加速器上进行的 HPIB 辐照 Al, Cr, Cu 和不锈钢样品的实验中,靶表面有明显的束斑痕迹,表面层的熔融和汽化相当明显,由此所产生的高温和高压足以改变材料表面的性能。图 22 是北京大学重离子物理研究所在“闪光二号”加速器上进行高功率离子束辐照金属表面材料改性研究时,测得的离子束辐照 Al 样品时,样品中的应力波波形。图 23 是辐照后的 Al 样品微观形貌。

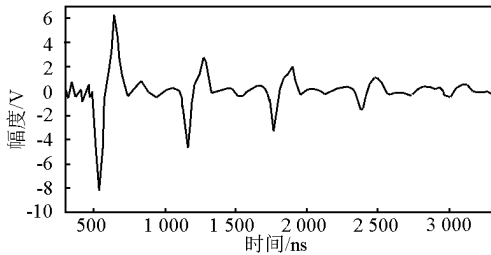


图 22 高功率离子束辐照 Al 样品的应力波波形

Fig. 22 Stress wave of Al samples irradiated by HPIB

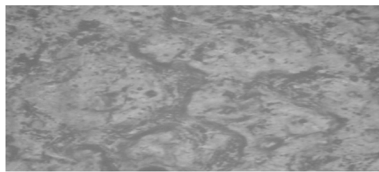


图 23 高功率离子束辐照后的 Al 样品微观特征形貌

Fig. 23 Micro-appearance of Al samples irradiated by HPIB

3.5 其他应用前景

3.5.1 模拟中子产生的反冲质子

高功率离子束的能谱与 MeV 量级的中子在轻材料(如聚乙烯)中产生的反冲质子很相似,可以用于模

拟中子产生的反冲质子,进行中子能谱测量技术研究,目前已开始进行中子能谱测量方面的应用研究。

3.5.2 利用高功率离子束产生强脉冲中子

利用高功率离子束产生强脉冲中子^[16],可以采用 CD₂ 薄膜作为高功率离子束二极管的阳极膜产生高功率氦(D⁺)束流,而氦束流与 T, D 和 Li 等元素发生核反应能够产生不同能量的脉冲中子,在中子辐照、堆材料研究、中子物理研究中迫切需要。

50 kA, 50 ns 的能量为 ~500 keV 的 D⁺ 束流与 ⁶Li 靶发生核反应的脉冲中子产额可以达到 10¹⁸ n/s,与 D 发生核反应所产生的 2~3 MeV 的脉冲中子产额可以达到 1.6 × 10¹⁸ n/s,与 T 发生核反应所产生的 14 MeV 脉冲中子产额可以达到 1.5 × 10¹⁹ n/s, 20 cm 处的注量率可以达到 10¹⁵ n/(cm² · s₀)

3.5.3 进行状态方程和冲击波物理研究

利用 HPIB 可以进行束靶相互作用形成冲击波的物理过程和状态方程研究,研究高温、高压和高能密度下材料的物理变化过程。目前“闪光二号”加速器产生的 HPIB 在材料的表面极薄层(约 1~5 mg/cm²) 范围内沉积的能注量达到 10~25 J/cm²,从而导致材料的快速蒸发和飞溅产生很强的压力波(约大于几百兆帕),压力波传播至靶的剩余部分而产生冲击波。几十微米厚的靶可以被飞溅材料加速至相当高的速度(约大于几千米每秒),这些飞溅碎片与固体靶发生碰撞产生持续时间约十几纳秒的冲击波,压力可达 100 MPa;如果离子束沉积的所有能量全部转换为动能,则可以产生相当大的膨胀速度,能量沉积区域比最初膨胀数倍,而能量沉积区域密度则相应下降,由此在小的样品中形成物质的平衡态和非平衡态;由于离子束的聚束作用使得固体靶的自由表面速度在几个纳秒的时间内迅速上升至数千米每秒。通过提高 HPIB 的功率并进

行聚焦后,自由表面速度将升至更高。

4 结语

主要介绍了箍缩聚焦二极管和自箍缩离子束二极管的研究进展。重点介绍了近几年发展的阳极杆箍缩聚焦二极管的理论模拟和实验结果,在“闪光二号”加速器和 2 MV 脉冲功率驱动源上进行了阳极杆箍缩二极管实验,二极管输出电压 1.8 ~ 2.1 mV,电流 40 ~ 60 kA,脉宽 50 ~ 60 ns,1 m 处的脉冲 X 剂量约 20 ~ 30 mGy,焦斑直径约 1 mm, X 射线最高能量 1.8 MeV。

利用“闪光二号”加速器进行了高功率离子束产生技术研究,获得了峰值能量 500 keV,峰值电流 160 kA 的高功率离子束。开展了高功率离子束应用研究,其中,有关利用高功率离子束产生准单能脉冲 γ 射线的研究是一个新方向,还初步开展了高功率离子束模拟软 X 射线在材料中的热—力学效应和辐照材料表面改性研究,分析了利用高功率离子束产生强脉冲中子、进行冲击波和状态方程研究,模拟中子产生的反冲质子等的应用前景。

从应用考虑,如何获得小焦点,形状和位置稳定的强流束,如何获得大面积、均匀性好的电子束或离子束,仍然是值得进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Cooperstein G, Boller J R, Comisso R J, et al. Theoretical modeling and experimental characterization of a rod - pinch diode[J]. Phys Plasmas, 2001, 8(10):4618 - 4636
- [2] Robert J Comisso, Gerald Cooperstein, David D Hinshelwood, et al. Experimental evaluation of a megavolt rod - pinch diode as a radiography source[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2002, 30(2):338 - 351
- [3] 马成刚,邓建军,谢敏. Rod - pinch 二极管理论及数值模拟

- [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2):348 - 352
- [4] 陈林,谢卫平,邓建军. X 射线闪光照相杆箍缩二极管技术最新进展[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(4):643 - 647
- [5] John O' Malley, Ian Smith, John Maenchen, et al. Advances in pulsed power - driven radiography systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7):1021 - 1042
- [6] 杨海亮,邱爱慈,孙剑锋,等. 强流脉冲粒子束技术研究新进展[A]. 2008 年全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文集[C]. 哈尔滨, 2008:90 - 105
- [7] 杨海亮,邱爱慈,孙剑锋,等. 高功率离子束的应用研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5):497 - 501
- [8] 杨海亮,邱爱慈,张嘉生,等. “闪光二号”加速器 HPIB 的产生及应用初步结果[J]. 物理学报, 2004, 53(2):406 - 412
- [9] 杨海亮,邱爱慈,孙剑锋,等. 强流脉冲质子束轰击 ^{19}F 靶产生 6 ~ 7 MeV 准单能脉冲 γ 射线初步实验研究[J]. 核技术, 2004, 27(3):188 - 192
- [10] Golden J, Mahaffey R A, Pasour J A, et al. Intense proton beam current measurement via prompt γ rays from nuclear reactions[J]. Rev Sci Instrum, 1978, 49(10):1384 - 1387
- [11] Young F C, Oliphant W F, Stephanakis S J, et al. Absolute calibration of a prompt gamma - ray detector for intense bursts of protons[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, PS - 9(1):24 - 29
- [12] 杨海亮,邱爱慈,何小平,等. 高功率离子束模拟材料的 X 射线热—力学效应研究[J]. 核技术, 2005, 28(1):24 - 29
- [13] 赵渭江,乐小云,颜莎,等. 强脉冲离子束材料表面改性研究进展[A]. 2001 年全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文集[C]. 深圳, 2001: 227 - 233
- [14] Zhao Weijiang, Remnev G E, Yan Sha, et al. Intense pulsed ion beam sources for industrial applications[J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2):1045 - 1048
- [15] Zhu Xiaopeng, Lei Mingkai, Ma Tengcai. Characterization of a high - intensity bipolar - mode pulsed ion source for surface modification of materials[J]. Rev Sci Instrum, 2002, 73(4):1728 - 1733
- [16] 王淦昌. 高功率粒子束及其应用[J]. 强激光与粒子束, 1989, 1(1):1 - 21

Research on two typical intense current self-pinching diodes

Yang Hailiang¹, Qiu Aici¹, Sun Jianfeng¹, Gao Yi^{1,2}, Su Zhaofeng¹,
Li Jingya¹, Sun Fengju¹, Liang Tianxue¹, Yin Jiahui¹, Cong Peitian¹,
Huang Jianjun¹, Ren Shuqing¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] Structures of several types of intense pinching diodes were introduced. The latest simulation and

experiment results on rod pinch focusing diodes were introduced. Experimental researches were carried out on FLASH II and 2 MV pulsed power drivers. The voltage of RPD is 1.8 ~ 2.1 MV, the current is 40 ~ 60 kA, the FWHM is 50 ~ 60 ns. The X-ray dose at 1 m from the diode in the forward direction was about 20 ~ 30 mGy. The spot diameter was about 1 mm, the maximum energy was 1.8 MeV. The preliminary research results for generation and application of high power ion beam (HPIB) on the FLASH II accelerator were reported. The structure and principle of pinch reflex ion beam diode were introduced. The HPIB peak current of ~160 kA is obtained with a peak energy of ~500 keV. The experimental investigations of generating 6 ~ 7 MeV quasi-monoenergetic pulsed γ -rays with high power ion (proton) beams striking ^{19}F target are presented. In addition, the research results for thermal-mechanical effects on the material irradiated with HPIB applied to simulation X-ray were also discussed.

[**Key words**] rod-pinch diode; ion beam diode; X-ray; high power ion beam; pinch; focus

(上接 69 页)

- [13] 巩敦卫, 郝国生, 周 勇, 等. 交互式遗传算法原理及其在群体决策中的应用[J]. 信息与控制, 2007, 36(5): 557 ~ 561
- [14] 孙晓燕, 王煦法, 巩敦卫. 分布协同交互式遗传算法

Group discussion based on the model of interactive genetic algorithms

Song Dongming, Zhu Yaoqin, Wu Huizhong

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[**Abstract**] Complex decision-making problem discussion in hall for workshop of metasyntetic engineering (HWME) requires that the experts' qualitative opinions should be converged in the end. To investigate the problem of how to converge their opinions, an approach of expert group discussion is proposed on the base of the model of interactive genetic algorithms, in which expert group thought and the computer technology are integrated tightly and the mutual recognition of community opinion is reached. Practices show that the optimal solution of complicated decision-making problem is obtained easily, and the approach is effective and in accord with the practical discussion process.

[**Key words**] hall for workshop of metasyntetic engineering; complex decision-making problem; interactive genetic algorithm; performance target demonstration