

闪光二号——一台太瓦级脉冲 电子束加速器及其应用¹⁾

邱爱慈

吕敏

(西北核技术研究所,西安 710024)

(系统工程研究所,北京 100101)

摘要 简要评述了高功率脉冲相对论电子束加速器国内外发展情况,指出西北核技术研究所研制成功的闪光二号加速器是我国在这一领域的重大进展. 描述了闪光二号加速器的 Marx 产生器,水介质同轴线和二极管的工作原理、结构及其参数,介绍了 1990 年以来,在这台加速器上,在电子束对材料结构的热力学效应,泵浦准分子激光和产生高功率微波等方面所进行的实验研究.

关键词 闪光二号加速器,相对论电子束,脉冲高功率技术

Abstract Flash II is a pulsed electron beam accelerator with a diode impedance less than 1 Ohm and beam current more than 1MA. An overview of the development of high power pulsed REB accelerators in China and abroad, including the successful development of Flash II in our institute, which is a major step forward for China in this field. The principle of operation and construction of the Marx generator, water-dielectric coaxial line and diode are described, and experimental research performed on the accelerator since 1990 is presented, including simulation of thermo-mechanical effects of X-rays on material structure, fabricatory of an excimer laser with electron beam pumping and generation of high power microwave radiation.

Key words Flash II accelerator, Relativistic electron beam, High pulsed power

1 脉冲电子束加速器的发展

强流脉冲相对论电子束加速器是 60 年代以来发展起来的一门新技术,起初它主要用于核武器效应模拟,以后在惯性约束聚变、离子束或电子束的产生、高功率微波、泵浦高功率气体激光、离子集团加速、强脉冲中子源、等离子体加热和约束等国防和能源研究方面得到应用. 近几年来高功率脉冲装置在民用工业中的应用已引起重视,如用于食品消毒和环境保护等.

强流脉冲电子束加速器通常由储能单元、脉冲压缩单元和能量转换单元三大部分组成.

脉冲压缩单元将储能单元输出的电脉冲,在时间上进行压缩,一般将微秒级脉冲波形压缩到几十 ns 至几百 ns,通过能量转换单元(二极管、内爆筒或线)产生电子束、离子束、韧致辐射、等离子体辐射等. 在最初十几年,储能单元通常采用电容储能的 Marx 产生器,脉冲压缩单元采用变压器油作为绝缘介质的双同轴线(Blumlein 传输线),其波阻抗一般为几十 Ω ,单台加速器的输出电流为几十 kA 到上百 kA,电压为几 MV 到十几 MV. 70 年代初,开始研究用去离子水作为绝缘介质的单同轴传输线,其

1) 1994 年 8 月 19 日收到初稿,1994 年 11 月 24 日收到修改稿.

波阻抗一般为几 Ω 以下,单台加速器的输出电流为几百 kA 到 MA,电压在 3MV 以下。以后,为了获得更大的电流和更高的功率,采用多台并联。而为获得更高的电压,则采用多级串联。1989 年,美国圣地亚实验室建成了当今世界上最大的脉冲 γ 射线源 Hermes-III, 输出电压 22MV, 电流 750kA, 在 1m 处的剂量率为 5×10^{10} GY/s, 照射体积为 $500\text{cm}^2 \times 15\text{cm}^{[1]}$ 。80 年代中期以来,发展了电感储能的高功率脉冲装置。这种装置的储能单元,第一级一般仍为电容储能的 Marx 产生器,通过闭合开关将能量转给电感储能单元,通过开断开关(如具有微秒导通时间的等离子体融断开关),将电压升高,电流减小,实现脉冲压缩和功率放大,把电磁能量传给二极管或其他负载。俄罗斯强流电子学研究所于 1987 年研制成功这种装置 GIT-4。当该装置的发生器输出电压为 600kV 时,等离子体开关开断电流达 2MA,开断电压为 1.76 MV,获得的输出功率为 3.42TW^[2]。目前,为了适应高新技术武器研究发展和开发民用工业的需要,高功率脉冲装置向紧凑、轻型、重复频率工作方式的方向发展。

国内这类加速器的研制是从 1971 年开始的。最早一台油介质 Blumlin 传输线型加速器

是现在在西北核技术研究所运行的“晨光号”加速器(1975 年由中国科学院高能物理研究所研制成功,输出指标为 1MV, 20kA, 25ns。1976 年在西北核技术研究所运行,现已改进,输出可达 2MV, 40kA)。1983 年中国工程物理研究院研制成功了油介质脉冲电子束加速器“闪光一号”,输出电压峰值为 8MV, 电流峰值为 94kA, 脉冲半高宽为 85ns, 在 1m 处的照射量率为 5.4×10^6 A/kg^[3]。1979 年以后,中国工程物理研究院、中国原子能科学研究院、中国科学院电子学研究所、国防科技大学相继研制成功水介质脉冲电子束加速器,阻抗在 10 Ω 左右,电流和束能在百 kA 和几 kJ。西北核技术研究所于 1982 年开始研制低阻抗(小于 2 Ω)的水介质脉冲电子束加速器,1988 年建成,1990 年初投入运行,1993 年 6 月通过由国防科学技术工业委员会组织的鉴定。经测试鉴定得到加速器的输出指标如表 1 所示。在加速器研制过程中,解决了高电压绝缘、高功率开关稳定性、预脉冲电压抑制、低阻抗二极管工作稳定性、电子束束斑面积大小的控制以及快脉冲测量中的抗干扰等一系列技术难题,技术上取得了重要突破。因此,它的研制成功,表明我国强流脉冲电子束加速器技术又达到了一个新的水平,跨入了国际

表 1 闪光二号加速器主要技术指标

类别	参数	二极管阻抗 (Ω)	二极管峰值电压 (MV)	二极管峰值电流 (MA)	脉冲宽度 (ns)	出阳极窗后电子束能量 (kJ)	束斑直径 (mm)
设计指标		2	1.2	0.55—0.65	70—80	27—34	不小于 50
		1	0.9	(力争)0.8—0.9	70—80	22—28	不小于 50
测试结果		2	1.47	0.72	70—80	43	135—180
		<1	0.92	1.03	70—80	32	100—160

先进行列。

2 闪光二号加速器的组成、工作原理及主要输出参数

闪光二号加速器长 18m, 宽 6.5m, 高 5.2m。整个加速器系统如图 1 所示, 外形见图 2。它

由 Marx 产生器、水介质同轴线(包括脉冲形成线、主开关、传输线、输出线、预脉冲开关、输出开关、变阻抗线)和低阻抗二极管构成的主机部分,以及 180t 变压器油处理装置, 15t 水处理装置, $\pm 120\text{kV}$ 直流充电电源, 1.8T 脉冲磁场系统, 触发、控制、测量等十几个配套设备所组成。

2.1 Marx 产生器

Marx 产生器是利用电容器并联充电通过火花开关串联放电原理得到电压倍增，将直流电压变为微秒级高电压脉冲，通过谐振充电，将能量传输给脉冲形成线(见图 3)。Marx 产生器工作原理虽然比较古老，但用在强流脉冲电子束加速器时，由于它的负载是水介质或油介质同轴线，而油、水的击穿强度取决于电压作用的有效时间和电极面积，因此需要采用新的结构形式，使产生器具有低的电感以保证形成线充电时间快(一般小于 $1\mu\text{s}$)。对于水介质低阻抗

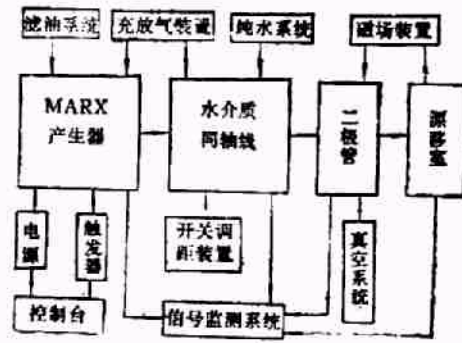


图 1 闪光二号加速器系统示意图

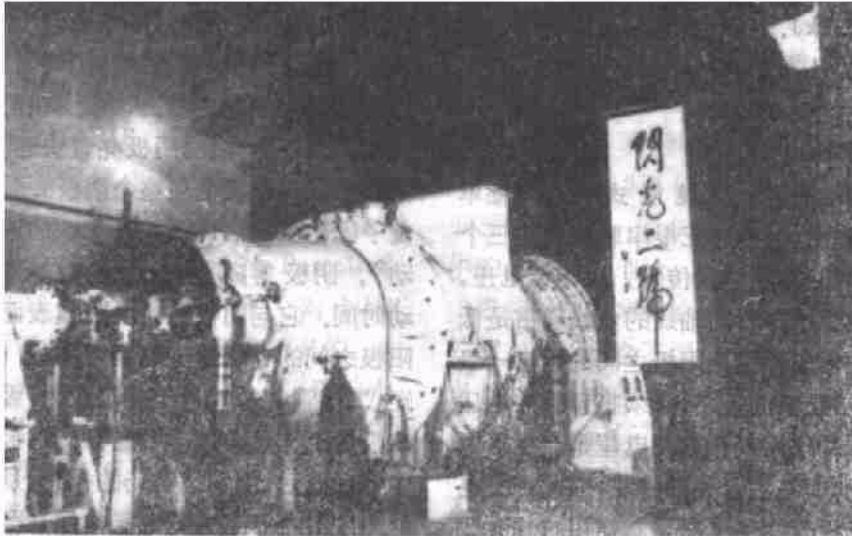


图 2 闪光二号加速器外观

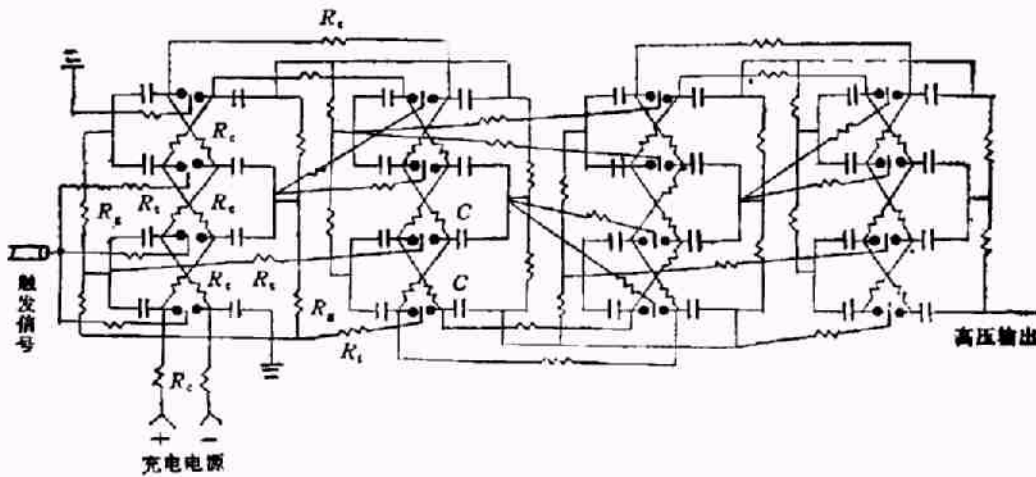


图 3 Marx 产生器电气线路图

(C ——电容器的电容; R_c ——充电电阻; R_t ——触发电阻; R_g ——接地电阻)

脉冲形成线,因其电容大且常用水介质开关作为形成线的输出开关,为使输出脉冲有快的上升时间,开关应具有高的击穿场强,因此要求产生器具有更低电感。当充电时间不能满足要求时,通常在产生器和形成线之间加一水介质中间储能电容器。

闪光二号的 Marx 产生器主要由 64 个 100 kV, 0.7 μ F 的电容器和 32 个火花开关组成,排列成 8 排,按 S 型放电回路连结,以抵消互感。火花开关采用外触发方式。产生器的电气线路如图 3 所示。实验测得其串联电感为 11.7 μ H。当直流充电电压为 ± 100 kV 时,输出电压为 6.4 MV,储能为 224 kJ。在产生器的上千次放炮运行中,总的自放几率 7.5%,单个开关的静态工作电压稳定性达到 99.75%。

2.2 水介质同轴线

水介质同轴线是电容储能式脉冲压缩单元,由内外导体组成,通过三根串联水线和三个串联开关,实现脉冲压缩和传输,以降低电压,增大电流。由于水介质同轴线的负载通常是低阻抗二极管,而二极管阴阳极之间的距离一般小于 1 cm,为防止极间短路,必须将预脉冲电压降低到足够低的水平(预脉冲电压是产生器对形成线充电期间,在主开关动作前,通过开关电容耦合加到二极管上的电压,其作用时间大致等于形成线充电时间,长达数百 ns,甚至 μ s)。同时还要求输出脉冲上升时间快,能量传输效率高。为防止水中发生电击穿,消除水中气泡是十分关键的。

在闪光二号加速器中,脉冲形成线通过水开关形成 80 ns 的电压脉冲,其波阻抗为 5 Ω 。输出线的波阻抗为 2 Ω (与 2 Ω 二极管阻抗匹配),长度为 200 cm。变阻抗线波阻抗从 2 Ω 变到 1 Ω (与 1 Ω 二极管阻抗匹配),长度为 100 cm。传输线波阻抗选为 3.2 Ω ,长度为 134 cm。主开关为水介质场畸变开关或单电极头水开关,预脉冲开关是 4 个并联的充 SF₆ 的气体开关。输出开关采用多针自击穿水开关。这三个开关的击穿时间选择和配合是非常重要的,将会影响输出脉冲电压幅值、脉冲上升时间、脉冲宽度以

及预脉冲电压作用时间,从而影响二极管的工作状态。因此,除设计合理外,还需在调试中仔细调节,才能得到所希望的输出参数。经过实际测量及数十次放炮实验统计,获得了稳定的开关工作状态和较好的脉冲陡化效果。

2.3 二极管

二极管主要由处于高真空中的阴极和阳极构成。它将电磁能转换成电子束动能。为得到有效的功率输出,低阻抗二极管必须是低电感的。强流电子束产生于等离子体阴极。当高压脉冲加到冷阴极场发射二极管上时,在阴极表面微观“胡须”(在显微镜下观察到的“胡须”状表面)顶部造成局部电场增强,产生稳定的场致发射。发射的强电子流使得“胡须”受到电阻性加热并发生爆炸性喷发,因而在阴极表面形成局部等离子体猝发,阴极亮斑快速膨胀和合并,很快形成一个覆盖在整个阴极表面上的阴极等离子体鞘层,并以 3—5 cm/ μ s 的速度向阳极运动^[4]。阴极等离子体形成的时间称为二极管启动时间。它与阴极材料、阴极表面状态以及阴阳极之间的电场强度等因素有关。启动时间愈短,二极管的有效输出功率愈大,因此它是衡量二极管工作状态的重要参数。阴极表面等离子体层形成后,由于德拜场的作用,从冷阴极表面继续发射电子进入等离子体层,此时,就有可能从逸出功为零的阴极等离子体中引出非常大的电子流。电子流在阴阳极间隙内受到与其相关的空间电荷限制定律支配,工作状态由 Child-Langmuir 公式描述。当电流超过临界电流时将发生自箍缩,主要取决于外加脉冲电压幅度和二极管纵横比(阴极半径与阴阳极间距离之比),理论上可用顺位流、聚焦流等理论模型描述。而临界电流是指阴极外缘发射电子的相对论回旋半径等于阴阳极间的距离时所对应的电流。在大纵横比二极管中,电子轰击阳极表面形成阳极等离子体效应不可忽视。它主要取决于电压脉冲上升时间、阳极材料及其表面状态。阳极等离子体的存在将导致电子流极强的聚焦^[4]。

闪光二号二极管是具有大纵横比的二极

管,其结构如图4所示。它要求产生大面积均匀的电子束。为避免电子束聚焦,外加一脉冲轴向磁场。阴极采用石墨材料。二极管启动时间为几个 ns 至十几 ns,取决于二极管的工作状态。阳极采用双层结构,用一层镀铝的 PET ($1\mu\text{mAl} + 12\mu\text{m PET}$) 作为阳极,再用一层 $30\mu\text{m}$ 厚的 PET 作为真空密封,这样,可防止阳极膜变形,保证阴阳极间隙之间电场分布比较均匀。1 Ω 二极管的电感为 25nH 。

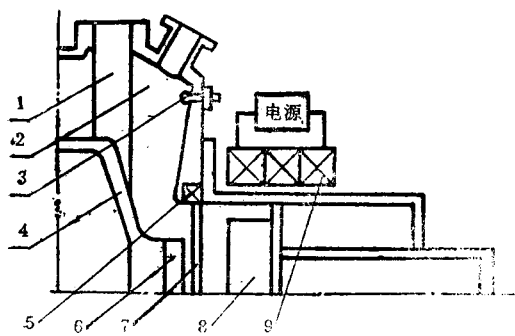


图4 二极管结构布置图
(1.绝缘隔板; 2.真空; 3.微分环; 4.阴极引杆;
5.罗可夫斯基线圈; 6.阴极头; 7.阳极膜; 8.靶;
9.磁场线圈)

电子束从薄阳极引出后,进入漂移管供进行物理实验用。漂移管内充一定气压,使强电子束在传输过程中达到空间电荷中和及空间电流中和。磁场线圈布置成磁透镜型,这样可以通过调节靶在漂移管中的位置,得到不同束斑大小和不同能通量密度的电子束。电子束的参数与阴极结构、阳极结构、纵横比、阴极处磁场、磁透镜比、漂移管内气压以及靶在漂移管中的位置等因素有关。在控制好以上参数的条件下,可以得到能量传输效率高、能通量密度分布均匀的电子束。

3 闪光二号加速器的应用

闪光二号加速器从1990年初投入运行以来,已运行放炮千余次,工作稳定可靠,进行了多种物理实验。从加速器发出点火指令到出束,时间为 $1.77\mu\text{s}$,抖动小于 100ns ,为用户提供

了可靠的同步触发信号。目前已开展的主要工作有:

3.1 材料和结构的热力学效应的实验研究

当强流脉冲电子束辐照固体靶时,能量沉积在靶前表面内(沉积深度取决于电子束动能),瞬间产生高温高压,使其局部熔化或汽化、成坑,在材料表面内形成一热击波并向材料内层传播,当传播到材料后表层自由面时,卸载而形成一拉伸波,可使后表层材料出现层裂破坏。这一现象一般发生在受照后 μs 时间内,称为材料响应。熔化、汽化物质的喷射将对整个结构产生一个反冲冲量,此冲量荷载的作用可使结构产生应力、应变、弹塑性变形和屈曲破坏等。这一现象一般发生在受照后的 ms 级时间内,称为结构响应。强流脉冲电子束辐照固体靶产生的这些效应与 X 射线产生的效应极为相似,因此,直至今日,在实验室内它仍是模拟 X 射线对材料和结构破坏效应的最有效手段。

在80年代中期,西北核技术研究所和航天工业部有关研究所等单位利用当时已建成的“晨光号”加速器,以及中国科学院电子学研究所和国防科技大学的相对论电子束加速器,开展了脉冲强流电子束辐照材料产生热击波的研究工作。但因输出束能低,束斑面积小(电子束直径小于 1cm),束能分布极不均匀,使实验数据的分析工作非常困难,更不能满足结构响应研究工作需要。闪光二号加速器以其高束能、低阻抗、束斑面积大、均匀性好区别于国内已有的几台脉冲电子束加速器。从1990年以来,西北核技术研究所和航天航空工业部有关研究所等单位利用闪光二号进行了大量的材料热击波和结构响应的实验研究,研究了不同类型、不同性能材料的热击波破坏效应,不同材料制成的结构件的变形和应变,以及喷射冲量、动态位移、动态应变等^[5,6]。在进行以上实验时,电子束到达靶上的参数为:束斑直径 $100\text{--}180\text{mm}$,能通量密度 $100\text{--}420\text{J}/\text{cm}^2$ 。这些研究工作对于国防科研的某些领域具有重要意义。

3.2 泵浦高功率 XeCl 准分子激光的实验研究

为了研究脉冲紫外激光与靶材的耦合效应

和开展 X 射线、电子束、激光与物质相互作用等效率性的研究,西北核技术研究所 1987 年就利用“晨光号”产生的电子束,获得了焦耳级 XeCl 激光输出。1991 年上半年利用闪光二号加速器作为泵浦源,产生了百焦耳级 XeCl 激光。当均匀电子束注入充有工作介质的气室后,产生大量的能量沉积,使气室内的原子激发和电离,同时生成大量的离子和次级电子。在这些新生成的离子和离子之间,离子与次级电子之间遵循一定的规律,发生相互作用并生成 XeCl 上能态。这种处于激发状态的 XeCl 上能态,由于受激发射而产生激光。为了获得大面积均匀电子束,阴极采用尺寸为 600mm × 15mm 的铜板基座加石墨尖和凹面石墨板两种结构形式,阳极采用 25μm 的钛箔。在二极管电压为 740 kV、电流为 330kA、总电子束能为 14kJ 时,并在激光腔内不同气体份 额 比 为 HCl:Xe:Ne=0.3%:2.7%:97%,总气压为 0.3—0.4MPa 的条件下,获得最大的 XeCl 激光能量输出为 136J,功率为 2.5×10^9 W。用虚共焦非稳腔改善了光束质量,最小光束散角达 1.5mrad,远场功率密度达 10^9 W/cm^{2[7]}。

3.3 产生高功率微波的实验研究

从 70 年代末期以来,用强流电子束产生高功率微波的研究有了很大发展,微波频率范围为 1—100GHz,功率高达几百 MW 至几十 GW。这类高功率微波源将来在军事上可能有十分重要的作用。它可为研究电子对抗、武器系统对微波的脆弱性、电磁耦合现象、远程雷达等提供重要手段,并具有作为微波武器的可能性,因此越来越受到美国和俄罗斯等国家的重视。我国高功率微波研究工作是从 80 年代后期开始的。为了研究高功率微波产生的机制、辐射效应和破坏机理,西北核技术研究所利用闪光二号产生的强流电子束开展了虚阴极振荡器原理产生高功率微波的实验研究¹⁾。

当强流相对论电子束注入到真空漂移管中时,如果电子束流超过空间电荷限制电流,束流就会在前进方向穿过阳极附近不远处,造成电荷堆积,形成虚阴极,最初形成虚阴极的位置主

要决定于电子动能和电子相对论等离子体振荡频率。虚阴极振荡激励微波的过程同时有两种激励机制:一是注入的部分电子被反射到二极管区,又被电场加速,在真阴极和虚阴极之间来回振荡;二是虚阴极的位置及势阱高度随时间周期性变化,形成振荡。这两种机制的竞争和干扰将导致输出的微波具有非相干、多模和低效率。因此需要仔细地设计振荡器结构,使两种机制产生的振荡具有几乎相同的频率,并能抑制反射电子。

在闪光二号加速器上进行了两轮虚阴极振荡器高功率微波产生实验。第一轮实验是在 1991 年 8 月,加速器运行在 2Ω 工作状态下,产生微波功率为 1.44GW,微波能量为 28.8J,脉冲宽度为 20ns。第二轮实验是在 1993 年 2 月,加速器运行在 1Ω 工作状态下,获得功率大于 4.5GW,脉冲宽度为 25—30ns,频率为 9—10 GHz,最大能量为 113J 的微波。

3.4 瞬态辐照效应及核辐射测试系统标定技术的实验研究

在闪光二号加速器上开展了抗辐照光纤的辐照性能研究,光纤辐照处的最大照射量分别为 6.97C/kg 和 1.47C/kg,取得了与国外同类研究工作相接近的实验结果。另外还进行了电子线路瞬态辐照效应研究以及电磁耦合和核辐射测试系统标定技术的研究等。在进行以上实验时,电子束经 30μm 厚的钛箔或镀铝 PET 膜引出,轰击钨靶产生韧致辐射。在二极管电压为 1.2MV、电流为 410kA 时,在离靶 1m 处的 X 射线照射量率为 6.7×10^4 A/kg,在 2cm 处的照射量率为 1.2×10^4 A/kg,照射面积为 110 cm²。

在以上每一种实验中,闪光二号加速器很好地满足了物理实验对机器参数提出的不同要求。在闪光二号加速器鉴定会上,以著名科学家王淦昌院士为主任委员的鉴定委员会和与会专家,对这台依靠自己力量研制成功的大型设备的性能、指标及在研制过程中安排各种物理

1) 范如玉,陕西省核学会第一次学术交流会议论文集第二分册,(1989),160。

实验,迅速取得成果,最大限度地发挥机器的效益,给予了高度的评价。闪光二号加速器已成为我国一台重要的核辐射效应模拟设备,必将在我国国防科研和高新技术研究中发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] J. J. Ramirez, K. R. Rrestwich, D. L. Johnson et al., 7th IEEE Pulse Power Conf., (1989), 26.
- [2] B. M. Kovalchud and G. A. Mesyats, Proceedings of the Eight International Conference on High-Power Particle Beams, Novosibirsk, USSR, July2-5, (1990), 92.
- [3] 王淦昌,强激光与粒子束,11(1989),1.
- [4] R. B. 米勒著,刘锡三等译,强流带电粒子束物理导论,原子能出版社,(1990),22-77.
- [5] 彭常贤、程桂淦、徐建波等,高压物理学报,74(1993),286.
- [6] 彭常贤、胥永亮、徐建波等,高压物理学报,81(1994),23.
- [7] 刘晶儒、孙瑞蕃、邱爱慈等,强激光与粒子束,51(1993),23.

光学悬浮及其应用¹⁾

赵理曾 秦 勇 聂玉昕

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

摘要 光学悬浮是利用光的辐射压力捕获粒子,并稳定地操纵它们定位的一种技术。文章简述了光学悬浮的基本原理,实验进展及其在空间材料制备、光子晶体构成和生物科学技术中的应用

关键词 光学悬浮,辐射压力,光陷阱

Abstract Optical levitation involves the use of radiation pressure for the stable trapping and manipulation of particles. The basic principle of optical levitation, experimental progress and applications in space material processing, photonic crystals research, the biological sciences and technology are reported.

Key words Optical levitation, Radiation pressure, Optical trap

光学悬浮是利用光的辐射压力捕获粒子,并稳定地操纵它们定位的一种技术^[1,2]。1909年,德拜在他的关于辐射压力的博士论文中,首先建议用辐射压力来抵消重力。但由于普通光源所产生的辐射压力是极微弱的,无法实现这项建议。激光的发明,为光悬浮奠定了基础。70年代初期,美国贝尔实验室的 A. Ashkin 首次从实验上观察到激光的辐射压力^[3],并用其成功地悬浮起一个直径为 20 μm 的透明玻璃小球^[4]。由于激光悬浮技术在很多方面的应用,如微小粒子光散射的研究、激光聚变中靶的支撑和定位、空间无容器加工材料、光子晶体的构成,特别是近年来在研究生物活细胞中的重要

应用,使得这项技术在理论和实验上,都得到广泛和深入的研究。

1 光悬浮的基本原理

光不仅携带能量,而且还带有动量。当光照射物体时,将与物体发生动量交换,从而对物体施加力,即辐射压力。辐射压力可分解为散射力和梯度力。散射力沿光传播的方向,其大小与光强成正比。梯度力指向光强梯度的方

1) 国家“八六三”高技术支持项目。
1994年10月17日收到初稿,1995年11月10日收到修改稿。