

低能电子直线加速器的应用

赖启基 蒋永兴 陆用义 纵 群

(南京大学物理系)

摘 要

本文着重介绍了能量在数十 MeV 以下的低能电子直线加速器在核物理以外领域的应用,而加速器本身仅在论述应用特点所必须时作简要说明。

加速器首先是为了适应核物理的研究而发展起来的,但后来很快渗透到其它领域,并日益显示其广阔的应用前景。七十年代以来加速器应用的发展特别迅速,例如放射生物学、材料科学、环境科学、冶金学、军事科学、癌症放疗、辐射加工、辐射消毒、射线探伤和辐射保鲜等方面已形成新型边缘学科或新型产业。现代化加速器的应用具有很高的科学价值和经济价值,因此受到了许多国家的重视。据统计,在发达国家,低能加速器应用所提供的总产值约为购买加速器总额的百倍。在美国,1980年加速器在工业和医学方面的应用就获得年产值200亿美元。

当前世界上各种类型的加速器约有8000台,85%是用于非核领域的低能加速器,其中电子直线加速器约3000台,其它电子加速器约1100台,离子注入机约2000台,其它离子加速器约700台。低能电子直线加速器的应用,是其中最具特色、最活跃的方面。以下将分别评述低能电子直线加速器的应用现状及前景。

一、在放射生物学方面的研究应用

现代放射生物学研究的目的主要是希望在分子层次上来描述和阐明放射生物学效应及其机理,从分子水平上阐明活机体的一般生物学原理。这一层次研究的特点是冲破了物理、化学和生物学学科之间的界线。基于放射生物

学的研究而发展起来的重要概念如水合电子、DNA修复、人工诱发突变、细胞周期、细胞增殖动力学、器官移植机制等与一般生命科学密切相关。另外,放射生物学又是癌症放疗、放射综合症治疗、辐射消毒灭菌等应用的基础。这一领域的研究已有二、三十年的历史,不过至今还很不成熟。

七十年代以前研究的放射源多数用X射线或 γ 射线,能量一般在1MeV以下。能量在几个MeV到数十MeV的电子直线加速器既可以产生低LET(因而低RBE)的电子和高能X线,又可以通过 (γ, n) 反应产生高LET(因而高RBE)的中子。由于电子直线加速器初、次级粒子的能量和剂量率都可以在大范围内调节,而且可产生极短的强辐射脉冲,因而很适合于开展上述领域的研究。

利用电子直线加速器的脉冲电子束对化学或生物样品进行脉冲辐解是研究化学反应动力学,尤其是自由基形成本质以及水合电子性质的重要实验技术。典型方法是:用装有快速照相示波器的动态分光光度计精确地、同步地摄取脉冲辐解样品的吸收光谱,通过计算机处理摄影描述,就可得悉辐射反应各个阶段的性质。脉冲辐解的时间分辨率可达 μs , ns 甚至 ps 量级。当前只有电子直线加速器可以产生这样短的束流脉冲^[1,2]。这种研究方法,显然不同于通常的用对最终辐解产物的分析来推断辐射反应机制的化学方法。脉冲辐解的研究将能提供各

阶段辐射反应动力学的详细信息,因而是深入研究辐射效应的先进手段^[3,4]。这些基础研究的进展,对辐射医学、辐射诱变育种、辐射消毒和辐射保鲜等应用和研究,将产生重要影响。

二、在固体物理与材料科学方面的研究和应用

电子直线加速器除了能产生电子和 X 射线,而且也能产生中子。这些粒子与固体材料相互作用,不论是从基础研究角度或从应用研究角度来看,都具有很丰富的内容。

1. 半导体辐照效应的研究^[5-7]

最初人们对半导体辐照效应的研究兴趣在于,研究和设计抗核辐射的半导体器件及电路。这些器件和电路在空间科学、核工业以及军事上都是很重要的。核电站、核反应堆和粒子加速器周围某些特殊电子系统要求用耐高剂量辐照的电子器件。地球人造卫星和星际探测飞行器内的电子系统也要求能经受强宇宙射线的辐照。这些器件和电路有两方面的问题:在强剂量率辐照下的瞬时效应造成的电子系统失控或损坏,和在一定剂量阈值以上的辐射造成系统的永久性损坏。

七十年代初以来,人们除了继续深入研究高能辐射对半导体器件的有害效应,寻找研制新的抗辐射器件外,还发现可以利用高能辐射有控制地在半导体材料中引入的某些具有复合中心作用的缺陷以降低少子寿命,从而提高器件的开关速度和高频特性。短短十几年来,这一有利的辐照应用取得了很大进展,特别是一些辐照硅功率器件(如 EI 固体闸流管、EI 结型功率开关管等)在国外(如美、日)已被认为是一类很有前途的代替传统工艺制备的器件。因为辐照方法制备的器件有:(1)可以精确、灵活地控制少子寿命,因而成品率高、器件性能的一致性; (2)器件的反向漏电流小,高温阻断特性好; (3)可实现局部区域寿命控制以获得某些特殊功能等优点,所以辐射的这一应用具有很高的经济效益,已为国内的初步实践所证

实。

利用电子直线加速器进行上述课题的研究是最合适的,因为电子直线加速器的多种辐射性质、能量范围以及输出束流的强度和结构等,在小区域中可以很好地模拟实际的核辐射源。当前的研究已初步表明,用高能(约 12 MeV)电子束辐照以控制材料的少子寿命,对改善器件的开关特性是非常好的方法。

2. 透明材料辐照着色效应的研究^[8]

许多透明材料如玻璃、水晶(SiO_2 晶体)、 Al_2O_3 晶体、碱卤化合物晶体(NaCl , KCl , KBr , LiF 等)和金剛石等都可以用掺入少量杂质来改变颜色。近年来国内外正大力研究利用 ^{60}Co 的 γ 射线和加速器电子线、X 射线对上述材料进行辐照引入色心缺陷来改变材料颜色。这往往是由于辐射释出的电子被杂质中心或结构应变部分的晶格所俘获而形成了 F 中心所致。辐照方法的特点是不改变材料的化学组分,控制颜色灵活精确,工艺简单,成本低廉,因而可获得很高的经济效益。最近一些报道表明,利用电子直线加速器的高能($\sim 15\text{MeV}$)电子或 X 射线辐照制备的色心激光晶体,要比 ^{60}Co 的 γ 射线辐照制备的激光晶体更具有优点,其主要优点是:不易退色,颜色均匀,达到一定色度所需剂量小等。

3. 电介质电子辐照荷电现象的研究

近年来随着航天科学技术的发展,介质材料在地球辐射带的高能带电粒子、特别是电子辐射下的荷电现象对材料物理性能的影响以及高分子聚合物在辐照加工中由于电荷积聚而发生介质击穿现象等有害效应受到人们的重视。同时,利用辐照在电介质中注入定向电荷,可能赋予这些材料一些特别有利的物理性能。因此,近年来正在多方面开展辐照荷电现象的研究。研究的材料包括各种高聚物、陶瓷、玻璃以及其他电介质。电子直线加速器的能量范围宽,因此在这一课题的研究中发挥特殊作用。

4. 高分子聚合物辐射效应的研究^[9,10]

高分子聚合物辐射改性的研究和辐照加工,是当前国际上非常活跃的一个领域。最初

是研究辐射对高聚物的有害效应,目的是为了探求耐辐照高分子材料以适应核工业的需要。后来发现,辐射效应并非都是有害的,有些聚合物在一定条件下经辐照后,许多重要性质反而变好,例如耐热性提高,力学性能改善等。近年来更由于化学高分子的辐射效应与更复杂的生物大分子的辐射效应之间有许多相似之处,从而引起人们更大的兴趣。虽然辐射反应的理论、辐射交联和降解理论等至今尚未成熟,但是实际的辐射应用已经实现。例如,通过辐射交联、辐射降解、辐射接枝等效应,研制和生产具有各种特色的高聚物及其复合体已是当今发达国家的一大产业。

目前比较成熟的辐照高分子产品有:电线电缆,热收缩材料,发泡塑料,辐射降解的超细粉末润滑剂和润滑油,接枝共聚复合材料等。正待开发的辐照高分子产品有:(1)生物相容性材料(如人造血等),特种功能高分子材料(如高透光性聚甲基丙烯酸甲酯、功能性超过滤膜等);(2)生物活性材料的固定,如固定化酶、抗体、细胞和药物,实现药物慢释放等;(3)生物量转换利用,如纤维素降解制造糖和酒精、超细粉末高级材料等;(4)耐辐照高分子材料;(5)天然橡胶胶乳的辐射硫化等。作为商品化工业辐照加工的加速器,高压型加速器(例如地那米加速器、绝缘芯变压加速器、电子帘加速器等)较为有利。但是,高压型加速器的缺点是能量不高,电子束的穿透能力差,韧致辐射的转换效率低,因而对于较厚材料的辐照无能为力。而电子直线加速器,由于能量高、韧致辐射产额高,所以对大厚度高分子材料的辐照,是目前最合适的设备。除了对大厚件辐照的特殊应用外,脉冲电子直线加速器对于研究辐射反应的机理、辐射反应动力学和辐射剂量率效应等,也是其他加速器无法比拟的。

三、在医疗卫生方面的研究和应用^[11-13]

当前加速器在医疗卫生事业中的应用有四个方面:肿瘤的放射治疗,肿瘤诊断(射线照相

和活化分析),医疗器材药品的消毒灭菌,制备医用同位素。目前,电子直线加速器主要用于肿瘤放射治疗和医疗用品的消毒灭菌。

1. 在癌症放射治疗方面的研究和应用

目前常用的治癌方法有手术疗法、放射疗法和化学疗法。手术疗法和放射疗法是治疗癌症的基本手段,化学疗法只是一种辅助手段。放射治疗的作用,是通过辐照消除癌细胞的增殖能力。正常细胞和癌细胞相比有更强的恢复能力,这种差异正是放射治疗中能够选择性地消灭癌细胞群而又能保存正常组织的根本原因。

在肿瘤放射治疗中,有一个特别重要的问题,即所谓的“氧效应”。实验已证明,氧是一种强的放射致敏剂。然而许多肿瘤,特别是晚期深部肿瘤却往往包含一部分缺氧细胞,这些细胞因其缺氧而具有一定的放射抗拒性,这也许是某些情况下放射治疗后不能控制癌症的原因。目前减弱“氧效应”影响的几种办法是:(1)采用分次疗法,常规的是每周五天,每天一次,一个疗程3—6周。(2)放疗前用高压氧吸入。(3)采用高LET射线以提高RBE。(4)在无毒性剂量水平上使用有利于氧化反应的亲电子性放射致敏的化学物质以提高治疗比。(5)改进医用加速器性能,以利于采用不同射线的混合照射、摆动治疗和立体放疗,提高肿瘤区与正常组织的吸收剂量比。(6)采用所谓“超分割”或“长期性分次”放疗,以期更好利用“恢复差异”和改进癌细胞供氧来提高疗效。

采用高LET粒子(高能中子、重离子、负 π 介子等)虽然可以克服氧效应影响,但是需要费用昂贵、规模巨大的加速器,目前国际上也只是在实验室进行研究。当前常规的低LET粒子(γ , e, X)放疗设备主要有⁶⁰Co源、电子感应加速器和电子直线加速器。由于电子直线加速器结构紧凑、射线品质好、剂量率高、能量可调范围宽,并且可出X, e线等特点,故便于采用不同能量的X, e混合治疗和摆动治疗。目前,国外正在研究设计由计算机控制的具有立体放疗功能的医用电子直线加速器,电子直线加速器是现代最先进的常规放疗设备。

2. 在医疗用品消毒及药物灭菌方面的研究和应用

当前国际上利用射线对医疗器械及其他用品的辐射消毒,已成为仅次于辐射加工的第二大“射线工业利用”的行业。特别是,高分子材料(包括人工的、天然的)大量用于输液输血装置、手术缝合线、注射器等医疗器械,而传统的热消毒方法不适用于高分子材料。化学消毒法虽然也属于冷消毒,但是往往消毒后又含有新的毒性,因而不受欢迎。例如,环氧乙烷消毒已被不少国家禁用。辐射消毒有很多优点,如适应性强,工艺简单且可自动化,节能,无毒,安全,消毒表里均匀、彻底,可用于包装物品的直接消毒等。

^{60}Co 放射源和电子直线加速器是当前辐射消毒灭菌的主要辐射源。电子直线加速器在这方面的应用有许多特殊优点:(1)由于脉冲剂量率比平均剂量率高三个数量级以上,用于消毒灭菌时,可提高杀灭能力而不损坏母体;(2)电子束及其韧致辐射具有不同的穿透能力,可对不同厚度器材和包装商品进行辐照以获得表里均匀的杀灭效果和避免包装过程重沾污。

四、在工业无损探伤方面的应用^[14]

工业无损探伤是低能电子直线加速器的一个重要应用方面,主要用于厚工件内层缺陷的探测。超声探伤也是厚工件内层探伤的一种有效手段,但是缺点是难以对缺陷定性,更难对缺陷进行定量判断,因而往往在探出问题后还要靠射线来检验。射线探伤是根据不同物质对穿透的射线有不同的吸收和散射这一原理来实现的。射线探伤中用得最广的有X射线、 γ 射线和中子线,中子照相探伤多在某些特殊场合应用。由于现代重型机械、核工业、国防工业、冶金工业等的发展,其重要设备关键部件的尺寸都比较大,而且对它们质量、安全运行、可靠性等的要求也越来越高,X射线机和放射源已不能满足这种部件的探伤要求。利用电子加速器产生的X射线的探伤技术就应运而生了。目前

探伤加速器主要有电子感应加速器、电子直线加速器和电子回旋加速器。电子感应加速器的焦点小(小于0.5mm),探伤相对灵敏度高(0.5—1%),结构简单,造价低,但是束流强度低,输出量一般只有几十R/min·m,因而其检验速率也较低,但目前还是用得较多。电子回旋加速器的输出量要比感应加速器高,但其焦点大($\phi \sim 2\text{mm}$),技术复杂,造价昂贵,因此用得不多。电子直线加速器虽然技术也复杂,焦点也较感应加速器大,但由于其结构紧凑,输出量大(可达到 $10^4\text{R}/\text{min}\cdot\text{m}$),因而使用灵活,生产率高、灵敏度也高(0.5—1.5%),得到了最广泛的应用。采用强聚焦方法可能把电子直线加速器束流打靶焦点尺寸压缩到1mm以下,这样其相对灵敏度可以与感应加速器相媲美,而生产率却比感应加速器高两个数量级以上。国外目前正在研究工业CT,即用电子计算机对光电转换系统进行信息图象处理。

五、在分析技术及物理研究方面的应用^[15-19]

1. 在活化分析方面的应用

利用低能加速器的射线对材料进行活化分析,以确定其中微量、痕量、超痕量杂质元素及其含量,是现代最先进的分析技术之一。用这一方法可以测定周期表中大部分元素的ppm至ppb级含量。用于活化分析的射线主要有快中子、带电粒子及光子,其中光子主要由电子直线加速器产生。光子活化分析的主要特点是对轻元素也可以达到很高的分析灵敏度,例如测定硅中的氧含量可达0.1ppm,其次是在分析生物、环境和岩石等样品时不会产生严重干扰,因此特别适合分析血、尿、头发、土壤、污泥、气溶胶等。此外,还可对一部分难熔金属如钽、铌、铝-钛合金等进行含氧的测量。光子活化分析的缺点是光核反应截面小。

2. 用于产生强的慢化正电子束

慢化正电子是一种有很广用途的粒子束,可用于原子物理、正电子素物理、正电子-原子

散射、表面物理、界面物理等方面的基础研究。七十年代,国外多用正电子源轰击金属靶产生慢化正电子,但是束流较弱。例如,用几十个mCi的 ^{58}Co 源只能得到 $10^5\text{e}^+/\text{s}$ 的慢化正电子。近年来,国外用35—100MeV的电子直线加速器轰击特别的靶,已能产生 $2 \times 10^6\text{e}^+/\text{s}$ 的慢化正电子。加速器慢化正电子容易调节能量。用能量为 10eV 量级以内的单色慢化正电子,可以对材料进行表层深度为 10^3\AA 量级以下的表面研究。慢化正电子技术在材料表面研究方面的这些特点是其他方法如扫描电镜、低能电子衍射所不具备的。

3. 用于产生沟道辐射

电子直线加速器产生的相对论高品质电子束在晶体沟道中运动时,由于与晶格原子横向势的相互作用,可产生一种高强度、高度定向、极化而具有很好单色性的辐射,称为电子沟道辐射。由于电子沟道辐射的许多优异性质,不仅在基础研究方面很有价值,而且作为一类新的X射线或 γ 射线源也将有很广阔的应用前景。用于产生沟道辐射的电子直线加速器的束流品质要求很高,特别是发射度指标。

4. 用于产生自由电子激光

激光在科学研究、国民经济各个领域中得到广泛的应用。但是,因为这类激光器发射光谱是依赖于不连续的原子、分子能级的跃迁,其波长通常是不可调的,同时由于工作物质热效应等原因,此类激光虽有极高的亮度,但其总功率却受到一定限制。

完全不同于上述激光产生机制的自由电子激光从七十年代后期开始迅速发展。基本原理是利用相对论高能电子的横向动量受到周期wiggler场的调制,同时在激光场作用下电子束群聚过程中把能量交给激光,在合适相位下产生共振,使激光功率得到放大。自由电子激光具有普通激光的一切特性,并且还有一些其他优越性:(1)采用不同的电子束能量,可使激光在很宽范围内连续可调,其波长覆盖毫米波至X光波段;(2)能量转换效率和输出功率比一般激光器的高得多,理论上效率可达50%,而

输出功率可达 10^4W ;(3)相干性、时间特性都很好。因此,自由电子激光的应用必将比普通激光更为广泛。强流感应直线加速器和强流电子直线加速器都是自由电子激光器的核心设备。目前美国和苏联均在大力发展自由电子激光。

5. 用于产生高功率定向微波

利用强流相对论电子束与等离子体相互作用激发很强的相干电磁辐射,是近年来低能电子加速器的又一重要应用。与其它现代高功率相干辐射源比较,电子束-等离子体微波辐射源具有一系列独特优点:(1)改变电子束能量与等离子体密度,可很方便地调谐相干微波的频率;(2)由于不受真空极限电流的限制,可获得很高的输出功率;(3)由于等离子体的存贮束能效应,可获得较宽的辐射脉冲;(4)对电子束的品质要求不高,因而对电子加速器的要求也不必高,容易实现。强流电子直线加速器和Max强流加速器是产生电子束-等离子体相干微波的重要核心设备,目前美国、苏联等正在大力研究。

- [1] W. J. Gallagher, *IEEE, Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24** (1977), 1640.
- [2] R. F. Koontz *ibid.*, **NS-26**(1979), 4129.
- [3] A. K. Pikaev, *Pulse Radiolysis of Water and Aqueous Solutions*, Indiana University Press, Bloomington & London, (1967).
- [4] John H. Baxendale et al., *The Study of Fast Processes and Transient Species by Electron Pulse Radiolysis*, D. Reidel Publishing Company, (1981), 35.
- [5] S. D. Brotherton et al., *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 5112.
- [6] 赖启基、吴凤美、蒋永兴等,核技术, No. 6(1986), 14.
- [7] 吴凤美、赖启基等,物理学报, **35**(1986), 638.
- [8] K. M. Ralls et al., *An Introduction to Materials Science and Engineering*, John Wiley (1976).
- [9] K. H. Morganstern, *Radiation Phys. Chem.*, **18-1** (1981), 1.
- [10] C. E. Snyder, *ibid.*, **22-1**(1983), 3.
- [11] C. Subnash et al., *Med. Phys.*, **12-4**(1985), 419.
- [12] C. J. Karzmark et al., *Phys. Medicine Biology*, **18-3** (1973), 321.
- [13] I. A. Purdy, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-26-1**(1979), 1833.
- [14] P. Mengers, *Materials Evaluation*, **42-10**(1984), 10.
- [15] R. H. Howell et al., *Appl. Phys. Lett.*, **40**(1982), 751.
- [16] 王广厚,物理学进展, **3**(1983), 169.
- [17] B. Hafize et al., *Phys. Rev. A*, **29-5**(1984), 2656.
- [18] J. A. Edighoffer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52-5**(1984), 344.
- [19] B. I. Aronov et al., *Plasma Phys.*, **18**(1976), 101.