



《中国工程物理研究院科技丛书》第054号

强流粒子束及其应用

Intense Particle Beams and its Applications

刘锡三 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 054 号

强流粒子束及其应用

**Intense Particle Beams and
its Applications**

刘锡三 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

强流粒子束及其应用 / 刘锡三著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 7

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05024 - 0

I. 强... II. 刘... III. 带电粒子 - 粒子束 - 研究 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 022045 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 23 字数 523 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

**国防科技图书出版基金
第五届评审委员会组成人员**

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 陈冀胜

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第五届编审委员会

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 (以姓名笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李 凡 李泽仁 苏 伟 苏 毅

汪小琳 吴志杰 张方晓 张富堂 张 健

罗顺火 孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨

顾 援 唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部负责人 李代斌

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- | | |
|-------------------------------|---------------------|
| 001 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 1989 年 11 月 |
| 002 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 1990 年 02 月 |
| 003 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 等编著 | 国防工业出版社 1991 年 09 月 |
| 004 线性代数方程组的迭代解法
胡家骥 编著 | 科学出版社 1991 年 12 月 |
| 005 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 006 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 007 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 12 月 |
| 008 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 编著 | 国防工业出版社 1992 年 10 月 |
| 009 粘性消去法和差分格式粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 1993 年 03 月 |
| 010 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 011 半导体材料辐射效应
曹建中 著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 012 炸药热分析
楚士晋 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 主编 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 015 二维非定常流和激波
王继海 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著
科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 主编
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著
国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法 著
国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著
国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理
赖祖武 等著
国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著
国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著
国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦 著
科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著
国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著
国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 编著
国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚 等著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 空气炮理论与实验技术
王金贵 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与激波
李维新 著
国防工业出版社 2000 年 12 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著
国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集
董海山 等编著
国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氦渗透
王佩璇 宋家树 著
国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文 编著
国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 常铁强 著
国防工业出版社 2004年11月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编
国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术
田东风 等编著
国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏毅 万敏 编著
国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高平 陈瀚林 著
国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著
国防工业出版社 2005年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著
国防工业出版社 2005年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著
国防工业出版社 2005年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜君 著
国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著
国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编
国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编
国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著
国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引
谭华 著
国防工业出版社 2007年3月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍钧 编著
国防工业出版社 2007年3月
- 054 强流粒子束及其应用
刘锡三 著
国防工业出版社 2007年7月

前 言

强流粒子束及其应用是高功率脉冲技术的续篇。由于高功率脉冲技术所涵盖的内容十分丰富,为了把这一研究领域内容写得深透一些,决定分成两本书来写。高功率脉冲技术是一门新兴学科,具有很强的军事应用背景,它又是一门高新技术学科,应用前景十分广阔。创立 40 多年来,发展十分迅速,应用领域不断扩大。为了给我国从事高功率脉冲技术研究的工程技术人员提供一部有价值的、比较系统的著作,前书主要论述脉冲功率加速器的物理基础,后书主要阐述强流和高亮度粒子束的物理基础,两书结合起来,为高功率脉冲技术领域提供了全面和系统的介绍。资料收集,注重国内已取得的研究成果和国际上最新的课题,我相信,深入了解这些基本物理概念,无论对新入门者或者已具有实践经验的人,使他们能够从更深层次来理解和发展高功率脉冲技术是会有帮助的。

近几年来,国内、外本领域的研究生不断增多,他们在论文中,对所从事的专门方向都进行了系统、深入的分析和探讨,随着高功率脉冲技术的不断拓展,尤其是闪光 X 射线照相、抗核加固、高功率微波、Z - 箍缩研究、惯性约束聚变等重要领域的成功应用,极大地丰富了高功率脉冲技术和强流束物理的研究内容,给它们的发展带来了新的生机。

感谢脉冲功率领域的同行们对本书内容做出了重要的贡献。本书的许多内容还得益于近几年强流束和高亮度束方面的许多最新的资料。

感谢王乃彦院士和邱爱慈院士为本书写了热情的推荐意见,也感谢杨大为、曾正中研究员在百忙中审查了书稿,并写了积极的评价意见。

本人退休以后,潜心于脉冲功率技术的烟气治理民用研究和整理书稿工作,2004 年 9 月在本书写作期间,例行体检发现我患了早期肺癌。正当我努力整理多年来积累的技术资料时,哪知无情的癌细胞已在悄悄地吞噬着我的生命,如同晴天霹雳,使我茫然。在院、所领导、同事友人,我的学生和家人们的关心和帮助下,依靠现代医学科技手段,开始了我与癌魔作斗争新的征程。手术后,恢复良好。现在我已完成此书,以此敬献给我国高功率脉冲技术领域的同志们,也了却了王淦昌老前辈生前希望能有我们自己专著的心愿。

最后,要感谢院科技丛书编辑部和国防工业出版社的同志,吕芳同志打印了书稿,王汉斌同志整理了全部插图,没有他们的支持和帮助,本书不可能及早面世。

作 者

2006 年 9 月 27 日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 历史发展概述	1
1.2 描述方法	3
1.3 强流束中基本物理问题	10
参考文献	19
第2章 强流束传输	20
2.1 强流束在真空中传输	20
2.2 强流束在中性气体中传输	39
2.3 强流束在等离子体中传输	47
2.4 强流束平衡态	52
2.5 强流束自治理论	64
2.6 强流束发射度增长	88
2.7 强流束中的波和不稳定性	92
参考文献	109
第3章 强流束的聚焦	111
3.1 强流束的电聚焦	111
3.2 强流束的磁聚焦	115
3.3 强流束的自聚焦	124
3.4 离子聚焦	126
3.5 最小焦斑讨论	129
3.6 关于束理论、计算机模拟和实验的比较	136
参考文献	138
第4章 闪光 X 射线照相及抗核加固	139
4.1 闪光 X 射线照相	139
4.2 抗核加固研究	190
参考文献	206
第5章 高功率微波及 Z-箍缩	207
5.1 高功率微波研究	207
5.2 Z-箍缩研究	221
参考文献	237
第6章 强流束用于高科技前沿研究	239
6.1 惯性约束聚变(ICF)	239

6.2	KrF 准分子激光器	252
6.3	电磁轨道炮	254
6.4	强脉冲中子源	257
6.5	粒子束武器研究	259
6.6	高能密度物理学	262
6.7	新加速原理	262
6.8	毛细管放电 X 射线激光	265
	参考文献	266
第 7 章	强流束的民用及展望	268
7.1	脉冲电晕放电脱硫脱硝新技术	268
7.2	工业应用概述	277
	参考文献	282
第 8 章	参数测量	283
8.1	引言	283
8.2	电压测量	291
8.3	电流测量	303
8.4	脉冲磁场测量	316
8.5	束位置的测量	321
8.6	束流剖面(束斑)测量	324
8.7	束流发射度的测量	326
8.8	束流能散度的测量	330
8.9	电子束总束能的测量	335
8.10	新测试方法研究	337
8.11	干扰的防止	340
	参考文献	343
附录	专业名词	345

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Outline of development history	1
1.2 Mathematical description methods	3
1.3 Fundamental physical problems in IPB	10
References	19
Chapter 2 IPB transport	20
2.1 IPB transport in vacuum	20
2.2 IPB transport in neutral gas	39
2.3 IPB transport in plasma	47
2.4 Equilibrium of IPB	52
2.5 Self-consistent theory of IPB	64
2.6 Emittance growth effect of IPB	88
2.7 Wave and instabilities in IPB	92
References	109
Chapter 3 Focusing of IPB	111
3.1 Electrical lens focusing of IPB	111
3.2 Magnetical lens focusing of IPB	115
3.3 Self-focusing of IPB	124
3.4 Ions focusing	126
3.5 Discussion of minimum spot size limited of IPB	129
3.6 Contrast of beam theory, Computer simulation and experiment	136
References	138
Chapter 4 FXR and Anti-nuclear Hardening	139
4.1 Flash X-ray radiography	139
4.2 Anti-nuclear hardening research	190
References	206
Chapter 5 HPM and Z-pinch	207
5.1 High power microwave	207
5.2 Z-pinch	221
References	237
Chapter 6 IPB are used for advanced technology researches	239
6.1 Inertial confinement fusion	239
6.2 Excited KrF laser	252

6.3	Electromagnetic rail gun	254
6.4	Intense pulsed neutron source	257
6.5	Particle beam weapon	259
6.6	High energy density physics	262
6.7	New acceleration principle studies	262
6.8	X-ray laser in capillary discharge	265
	References	266
Chapter 7	IPB are used as civil field forecast	268
7.1	New technology of De-SO ₂ and De-NO _x	268
7.2	Some industry application comment	277
	References	282
Chapter 8	Parameters Measurement	283
8.1	Introduction	283
8.2	Voltage monitor	291
8.3	Current monitor	303
8.4	Pulsed magnetic field monitor	316
8.5	Beam position measurement	321
8.6	Beam profile measurement	324
8.7	Emittance measurement	326
8.8	Energy spectrum measurement	330
8.9	Total beam energy measurement	335
8.10	New measurement method	337
8.11	Protection of interference	340
	References	343
Appendix	Special Vocabulary	345

第 1 章 绪 论

1.1 历史发展概述

近 40 年来,强流粒子束(包括电子束和离子束)物理与技术迅速发展,并逐渐形成了带电粒子束物理学中一个崭新的学科分支。人们习惯上又称它们为高功率束、高亮度束或强流相对论性电子束(缩写 IREB)。主要研究大量带电粒子的集体物理现象和行为,这是 21 世纪物理学的前沿研究领域之一。

叙述带电粒子束的发展历史,首先应追溯到 19 世纪末叶自由电子的发现和实验研究。1883 年爱迪生(Edison)发现了灼热灯丝发射带负电粒子的现象即爱迪生效应,1897 年汤姆逊(Thomson)研究认定了阴极射线为带负电的粒子,测定了它的电荷,认为这种粒子即电子带有普遍性,到了 1906 年密立根(Millikan)测定了电子的荷质比量值,这些研究标志着自由电子的发现。随后,进行了一系列与电子发射有关的基本理论研究。

1901 年理查逊(Richardson),1919 年肖特基(Schottky)确定了热电子发射的基本规律,1911 年柴尔德(Child)和 1913 年朗缪尔(Langmuir)推导出了著名的关于空间电荷限制电流的 $3/2$ 次方定律。1928 年福勒(Fowler)和诺尔德海姆(Nordheim)首次提出了场致发射电子的理论,1931 年福勒等人又建立了光电子发射的基本理论,上述工作对电子束的产生和传输奠定了早期的理论基础。

自由离子的发现和研究的与气体放电现象研究密切相关的。1897 年汤森(Townsend)详细分析了气体放电中的电离现象,1929 年朗缪尔和汤克斯(Tonks)首次提出了气体放电的等离子体概念,同期萨哈(Saha)对热电离和后来弥勒(Mueller)等人关于场致电离和场致蒸发的研究都对离子束的技术发展奠定了基础。

自 20 世纪 30 年代以来,电子束技术在电子显微镜、电子束器件(如阴极射线管、电视)、谱仪、微波管器件中取得成功应用。50 年代,特别是带电粒子加速器技术取得了巨大发展,形成并建立了带电粒子几何电子光学和束流光学系统的基本理论。尤其是高能粒子加速器是粒子束的重要领域,将几何光学扩展到束流光学,产生了高能束流粒子动力学,把研究束传输问题发展到一个新阶段。

强流相对论性电子束物理研究是从 1934 年贝纳特(Bennett)研究了通过等离子体背景中,电中和的强流束平衡箍缩条件问题^[1]和 1939 年阿尔芬(Alfven)研究宇宙射线中,电中和束在自身磁场中传输的极限电流问题开始的^[2]。1957 年劳逊(Lawson)^[3]研究了实验室中的强流束,推进了阿尔芬公式,1956 年布德凯尔(Budker)论证了利用强流相对论性电子束来聚焦高能离子束的设想方案^[4]。

直到 20 世纪 60 年代初期,英国原子武器研究中心(AWRE)的马丁(Martin)及其小组开创了脉冲功率技术的新纪元^[5],才使得这种强流束的产生和应用真正变为现实,成

为强流束的第一个里程碑。1965 年格雷别尔 (Graybill) 和纳波 (Nablo) 第一次报告了观察到了强流电子束^[6], 并提出了 IREB 束的参数范围:

电子能量: 100keV ~ 10MeV

束电流: 10kA ~ 1MA

脉冲宽度: 10ns ~ 100ns

束能量: 10kJ ~ 1MJ

至此, 关于强流束的实验与理论研究在圣地亚实验室 (Sandia), 海军实验室 (NRL)、康乃尔大学 (Conell)、物理国际公司 (PI) 广泛展开。1968 年, 杨纳斯 (Yonas) 和斯潘思 (Spence) 进行了高 ν/γ 束传输的实验研究^[7], 1969 年, 柯泼斯坦 (G. Copperstein)、马丁 (T. H. Martin) 和约翰逊 (D. Johnson) 进行了高 ν/γ 电子束的传输、压缩和合并技术研究^[8], 1968 年罗伯特 (Robert) 和贝纳特进行了电子束在稠密等离子体中的传输研究, 首次发现并观测到返回电流^[9]。

强流带电粒子束中最基本的问题是空间电荷效应和由此产生的对传输电流的限制。

二极管中的空间电荷限制电流, 已由著名的 3/2 次方定律给出, 而电子束在漂移管中的传输要稍晚一些。1971 年波格旦凯维齐 (Bogdankevich) 和鲁克哈兹 (Rukhadze) 推导了真空漂移管中的极限传输电流公式。1969 年 NRL 的派克 (Packh) 提出并由 1975 年 Creedon 发展了顺位流模型, 1974 年哥德斯坦 (Goldstein) 进一步提出了聚焦流模型, 1975 年柯泼斯坦 (Cooperstein) 指出最后压缩阶段, 等离子体起了决定性作用, 又进行了修正。

1973 年罗英 (Ron)、蒙代尔 (Mondell) 和罗斯托克 (Rostoker) 简称 RMR, 1974 年罗夫拉斯 (Lovelace) 和奥特 (Ott), 1977 年格雷登 (Creedon) 和 1979 年门代尔 (Mendell) 建立和完善了磁绝缘传输线理论 (MITL), 详细研究了真空中高功率电磁能量的传输问题。

1970 年哈默 (Harmmer) 和罗斯托克 (Rostoker) 利用任意运动常数, 建立分布函数求解符拉索夫 (Vlasov) 方程, 创建了著名的哈默 IREB 束传输完整的基本理论^[10]。1971 年托福 (Toefer)、1974 年托福和玻开 (Poukey), 1976 年, 汉地 (Hadiey) 共同建立了强流束在气体中和低密度等离子体中的传输理论, 1975 年安格伏奴夫 (Agafonov) 研究了有限磁场中束的传输, 1979 年罗德 (Thode) 研究了阳极箔多次散射对限制电流的影响, 1980 年柯罗姆斑特 (Colombant) 等提出了等离子体通道传输概念^[11]。

强流束物理另一个重要的里程碑是 1945 年符拉索夫创立了著名的 Vlasov 方程^[12], 他将统计力学的刘维定理, 麦克斯韦方程与粒子动力学方程集成在一个自治的粒子束理论模型里, 这一方法, 至今仍是强流束理论不可缺少的分析工具。

1959 年卡普钦斯基 (Kapchinskij) 和符拉迪米斯基 (Vladimiskij) 提出了 Vlasov 方程组一个特解, 后来命名为 K-V 分布^[13]。1971 年拉普斯脱尔 (Lapostolle) 引入了均方根 (rms) 量来描述束的性质 (束半径和发射度等), 而后发展了等效束的概念^[14], 我们就可以方便地比较在相空间中不同分布束流的特性。

强流束理论的发展还与其应用密切相关, 1968 年温特伯格 (F. Winterberg) 提出电子束聚变概念, 1975 年沃尔森 (C. L. Olson) 提出集体加速研究, 1979 年鲁达柯夫 (L. I. Rudakov) 建议电磁套筒内爆, 1980 年汉弗莱斯 (S. Humphreis) 提出等离子体加热, 1981 年杨纳斯提出离子束聚变, 这些研究都大大推动了强流束理论研究向广度和深度发展。

强流粒子束的发展原动力, 主要来自闪光 X 射线照相和抗核加固研究, 至今这两个