

译者序

译者在为俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所电弧放电物理实验室主任奇马舍夫斯基(А.Н.Тимошевский)博士等做翻译时得到这本书。同时,也得到《低温等离子体丛书》其他卷,从中了解到该研究所从20世纪50年代就开始研究低温等离子体,主要是研究宇宙飞行器再入大气层的问题——壁的烧蚀问题,这项工作的奠基者就是朱可夫。在他的领导下,该所建立了电弧风洞(差不多与美国国家航空航天局(NASA)同时),从那时起,就开始了低温等离子体的研究,并逐渐成为苏联低温等离子体研究的中心。该所广泛研究了等离子体发生器、等离子体化学、新材料、等离子体涂层及其在环境保护领域的应用、新型燃烧方式、处理废物等,是世界公认的等离子体研究中心。《低温等离子体丛书》前18卷是1990~2000年在朱可夫院士领导下陆续出版的,其时间之长、工作量之大毋庸置疑,可以说这是低温等离子体方面的巨著。译者认为,它对中国低温等离子体研究人员很有帮助,因此翻译了这套丛书的第20卷,希望对我国低温等离子体的研究与应用有帮助。

为了方便读者了解这套丛书的内容,现列出已出版的各卷名称:

- 第1卷 电弧柱理论
- 第2卷 低温等离子体的控制问题及动力学研究的数学方法
- 第3卷 等离子体化学
- 第4卷 等离子体化学工艺
- 第5卷 电弧燃烧的稳定性
- 第6卷 高频及超高频等离子体发生器
- 第7卷 在磁场里强流弧放电
- 第8卷 等离子体冶金
- 第9卷 低温等离子体诊断
- 第10卷 近电极区域过程的理论与计算
- 第11卷 阴极过程的数学模拟
- 第12卷 超细粉末的等离子体化学合成及其在金属和合金改性中的应用
- 第13卷 等离子体断层扫描(等离子体CT)
- 第14卷 用等离子体化学合成超细粉末来增强金属材料、聚合材料和弹性材料的性能

第 15 卷 基于等离子体喷涂理论和模型实验的合金水滴热物理碰撞机制

第 16 卷 等离子体无油点燃锅炉和煤粉火焰的稳定燃烧

第 17 卷 热等离子体电弧发生器

第 18 卷 材料加工中的高能量过程*

第 20 卷是《低温等离子体丛书》的最后一卷，前 18 卷是在 1990~2000 年出版的，结尾卷本来计划总结 20 世纪低温等离子体的理论与应用：既提出存在的问题，又对今后的研究做出展望，可是这个工作由于 1998 年 12 月朱可夫的逝世而中断，他的学生及同事完成了最后一卷，并且决定今后再出版一套高温等离子体工艺过程方面的丛书。

邱励俭

2007 年 9 月

* 《低温等离子体》丛书第 19 卷信息不详。——编辑注

前 言

《低温等离子体丛书》是由朱可夫(М. Ф. Жуков)院士提出并在他的直接领导下完成的,第20卷是其最后一卷。前18卷是在1990~2000年出版的,结尾卷本来计划总结20世纪低温等离子体领域取得的理论与应用方面的成果:既要提出存在的问题,又要对今后的研究方向做出展望。1998年12月朱可夫逝世,这项工作被迫中断。后来,他的学生及同事不仅完成了最后一卷的出版,而且决定出版一套高温等离子体工艺过程方面的丛书。

由于各种原因,第20卷的编写持续了几年,有人建议把这一卷作为朱可夫院士的悼念卷,以此来表彰他对低温等离子体学科发展所做的贡献。参与第20卷编写的有朱可夫的学生,也有他的同事,这些人对他的回忆都是很珍贵的,所以第20卷具有特殊的意义:除了回顾朱可夫取得的科学成就外,也囊括了他对这一领域未来的广泛兴趣。按照朱可夫的指示和建议,结尾卷既包括电弧等离子体理论与实验研究的总结,又包括低温等离子体在一些高温过程中非常有趣的工艺应用。第20卷分为三大部分:

第一部分有朱可夫传记,还有朱可夫自己写的一些文章,这些文章是关于新西伯利亚低温等离子体基地创建过程的,是为了纪念苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所(ИТПМ СО РАН)成立40周年而撰写。第一部分还有一些朱可夫的学生和同事写的热情洋溢的文章以及他们对朱可夫的感谢。

第二部分主要总结低温等离子体发生器、电弧、流动气体理论和实验研究成果,这里不再重复前几卷已经得到的结果,只引出结论性数据,而这些数据是在最近几年取得的,指明了该领域的新方向(不仅包括俄罗斯,而且包括世界其他国家),既有解析解,也有数值模拟结果,这些内容既珍贵,又复杂(第3~6章、第10章)。在第二部分,总体上,实验研究是辅助的,只是为了说明在实际条件下的相应结果。但在复杂的电弧加热以及非寻常的气体如水蒸气、氢化物、氟化物里,实验研究是主要的(第7、8章)。第6章公布了一些有争议的观点,即电弧过程的复杂性,这也是朱可夫院士经常强调的。朱可夫学派的兴趣不仅仅局限于电弧等离子体,也关注另外一些类型的放电研究(第9~11章)。

事实上,低温等离子体的各种工艺过程在世界发达国家的工业中都已得到应用。第三部分主要集中在前几卷没有涉及或仅仅只有简单介绍的部分。第三部分的内容都是由相关领域的杰出专家撰写的,涉及范围很广,有生产新材料的研究

(第 12、16 章)、空气动力学方面的研究(第 13 章)、镀膜的研究(第 14、15 章)、等离子体化学工艺的研究(第 17、18 章)、能源领域的研究(第 19~21 章)、材料性能的增强研究(第 22、23 章)和阴极腐蚀的热机制研究(第 24 章)。

第 20 卷所引用的材料并不都和电弧放电有直接联系,参与的作者主要是朱可夫的学生和同事,他们的研究领域非常广泛,也是相应领域的领导者,他们把自己的工作写进来。所以第 20 卷和前几卷的传统写法不一样。我们在标题中仅仅写出 3 位主要作者,还有 50 多位学者参与编写,他们的工作在各章会提到。

第 20 卷编者深深感谢朱可夫的所有同事、支持者、学生及朋友。

俄罗斯科学院通讯院士
弗尔曼(В. М. Фомин)

俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所技术科学博士
扎什京(И. М. Засынкин)

朱可夫传记^①

朱可夫(М. Ф. Жуков)于1917年6月出生在阿尔罗夫州(Орлов)。他的父亲是铁路车站工人。1931年朱可夫中学(七年制)毕业,进入莫斯科轴承工厂附属函授学校学习。在那里他掌握了车工、钳工、铣工的专长,在工厂附属函授学校毕业后被推荐到“工人系”,入学便读了二年级,于1935年完成学业。

学习期间,他对天文和火箭技术非常感兴趣。“工人系”的学生有机会重新选择职业或进入大学,但要通过竞争。此时对于年轻的朱可夫来说,有一些困难,尽管他已经熟悉了许多高等学校的课程,但没有足够的生活经历。

这时,一个意外的机会不期而至,他写了一封信给当时的空气动力研究院著名学者车沃尔可夫斯基(К.Э.Циолковский)。朱可夫没指望车沃尔可夫斯基会回信,但他很快便收到回信。车沃尔可夫斯基当时被任命为莫斯科大学(МГУ)数学力学系教授,这封信决定了朱可夫的命运。1935年,他通过考试成为莫斯科大学的学生。

大学毕业,通常国家对高等学校大学生的预分配就没有了,相伴而来的是卫国战争的开始。

1941年,意想不到的新生活开始了,朱可夫没有像通常那样被派往大学担任教学工作,而是被派到茹可夫斯基中央气动研究所1号实验室做研究工作。在战争的前几个月,他曾在那里参加了火箭系统部分环节的计算工作。1941~1942年,朱可夫工作、生活在新西伯利亚,中央气动研究所的部分研究人员也撤退到那里。1941年9月,他在阿布拉莫维奇教授和乔连科夫副博士的直接领导下进行了涡轮发动机部件的估算,以满足研制新一代飞机提出的要求,而且完成了一些具体的国防任务。在完成这些任务时,他已经是高级工程师。

1943年,他们撤回莫斯科,继续在莫斯科中央空气研究院(ЦАГИ)开展工作。然后(1946~1956年)在巴拉诺夫中央航空发动机研究所(Центральный Институт Авиационно Моторостроения ЦИАМ им.П.В.Баранова),朱可夫以高级研究员的身份主管研究部。在中央航空发动机研究所工作期间,他攻读莫斯科航空学院研究生(1946~1949年),并于1950年取得副博士学位。朱可夫在中央航空发动机研究所进行了高水平的研究,从1942年开始研究新型发动机(超声速压气机)的一些部

^① 材料选自:俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所. 人物、时代、事件. 新西伯利亚出版社, 2000. 82~85

件。在研究部的这一时期，朱可夫(和伊利舍夫等)进行了各种形式绕流的理论实验研究，包括新一代航空发动机透平压气机叶栅和超声速或跨声速流动。为进行0.7~1.5马赫数的实验，就要建立一种专门的风洞，当时在世界上还没有这样的风洞。后来才知道，相同的工作在美国国家航空航天局(NASA)、苏联莫斯科中央空气研究院和朱可夫的研究部分别独立进行(当时是严格保密的)，这项研究对发展超声速航空起了很大作用。有趣的是，在用不同结构解决跨声速气动风洞的“扩散”问题时，三个研究单位的最后研究结果完全一样：在“扩散”喷管断面速度场有高度的均匀性，喷管形状具有普遍性，可以用部分气体经过喷管旁边的气道调节喷管出口速度。1952年结束这个工作后，朱可夫等曾经出版一本论文集《在跨声速和超声速下叶栅的理论与实验研究》。

从1956年起，朱可夫的科学兴趣转向研究等离子体气体放电，同时设计了强电弧等离子体发生器。由于当时苏联顺利地发射了洲际火箭，所以他对军事航空的兴趣降低了，他的研究方向发生了巨大的转变。

1954~1956年，朱可夫在航空工业科学院讲授气体动力学，所在教研室的名称是发动机理论、结构和计算教研室。当时，为了给学生备课，他写过几本参考书。同时，他在全苏机械制造函授学院授课，讲授理论力学。在理论与应用力学研究所研究生部和茹可夫斯基军事航空学院军事研究班里，朱可夫对储备高质量的人才给予了很大关注。

1959年1月，朱可夫接受了赫利斯坦诺维奇(С.А. Христиановича)院士的邀请，根据苏联科学院主席团的调令，他离开了中央航空发动机研究所，被任命为苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所(Институт Теоритической и Прикладной Механики, ИТПМ)等离子体动力学研究室主任。从那时起，他开始了西伯利亚科学中心的科学和组织活动，并着手建立电弧放电实验室。

从那时起，朱可夫几十年的科学活动都和气体等离子体放电及其稳定性、邻近电极过程研究有关，包括高效电弧发生器的设计及其在低温等离子体过程中的应用。

电弧放电实验室的建立为今后建立宏大的等离子体部奠定了基础，等离子体部里的高水平博士、副博士就是在研究所中成长的。为了深刻地理解发生在电弧发生器里的等离子体复杂现象(在电极表面和其他过程中的现象)，等离子体部培养了很多交叉学科如冶金、气体动力学、热物理、化学等学科方面的专家。

1959年3月，根据苏联科学院西伯利亚分院主席团的任命，朱可夫担任苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所副所长，主管科学工作。开始的两年，他不得不花费大量精力去建设该研究所行政大楼和气动力学大楼、压气机和储气站。1961年负责这项工作的副总工程师被撤换，他接手了副总工程师的工作。

1962年,朱可夫完成了博士论文答辩。1965年,赫利斯坦诺维奇院士回到莫斯科,在这个过渡时期(1965年5月至1966年8月),实际上是朱可夫在领导该研究所。

1966年8月,斯特鲁曼斯基(В.В. Струминский)院士被任命为理论与应用力学研究所所长。朱可夫担任副所长,同时他还领导等离子体动力学部。1968年,朱可夫当选为苏联科学院通信院士。

1970年,根据苏联国家科学技术委员会(ГКНТ СССР)关于调整科学力量的决议,苏联科学院西伯利亚分院主席团(СО АН СССР)决定将等离子体动力学部全体成员与研究方向合并到苏联科学院西伯利亚分院热物理研究所(Институт Теплофизики СО АН СССР)。1996年,根据俄罗斯科学院西伯利亚分院主席团176号决议(发布于1996年7月15日),将等离子体动力学部重新搬回理论与应用力学研究所,在这里已经形成了整个的研究基础,因为那时国家遭受严重的财政危机,电能开始涨价,在热物理研究所不可能完成实验基地的建设,通过研究所和实验室的共同努力,原有的课题才得以被保留,并有被扩大的可能。

1970年底,根据那维宾也法院士(М.А.Лаврентьев)的倡议,在新西伯利亚城建立了一个设计局“Энергохиммаш”(现在叫新西伯利亚化工机械局),里面有专门的能源化学机械设计部门,专门设计与等离子体技术有关的工艺过程,从最开始,朱可夫就是设计局的科学领导(顾问)。

朱可夫1975~1990年成为苏联科学院西伯利亚分院主席团成员,1975~1980年兼任苏联科学院西伯利亚分院主席团秘书长。

由于在卫国战争期间的忘我工作、多年来富有成效的科学活动以及在培养高素质科技干部工作中的巨大贡献,朱可夫被授予卫国战争劳动奖章,劳动红旗勋章,十月革命勋章,人民友谊勋章,卫国战争胜利30周年、40周年、50周年奖章(对应1975年、1985年、1995年)，“劳动能手”奖章。

1981年,朱可夫因组织保加利亚科学院和苏联科学院在科学技术上的合作而被保加利亚科学院授予奖状。

1982年,由于在气体放电等离子体过程中卓有成效的研究以及在建立高效的低温等离子体发生器方面的贡献,朱可夫和同事乌留科夫(Б.А.Урюков)以及许多部门的学者都被授予苏联国家奖。由于“高温下的热交换”,朱可夫与卢卡索夫(В.П.Лукашов)获得苏联科学院奖与捷克斯洛伐克科学院国家奖。

1995年,由于朱可夫出色的科学研究工作,吉尔吉斯斯坦授予他荣誉奖状。

15年中,朱可夫一直担任苏联科学院西伯利亚分院《科学通报》主编、*Beitrage Plasmaphysik* 杂志编委、苏联科学院杂志《建立新材料的科学基础》学术委员会主席。他参与撰写了230篇文章、12本专著,并拥有很多专利,还是20卷《低温等离子体丛书》的主要倡导者和主编,1990~1996年,这套丛书出版了16卷。

1992年，朱可夫被选为火箭与航空科学院院士、工程科学院荣誉成员。1995年，他成为国际能源科学院成员。

朱可夫具有一种锲而不舍的精神，他对培养高水平的科研人员非常关心，不论是在等离子体动力学部还是在其他单位——那些做了类似题目的单位(包括苏联加盟共和国的研究所)都是如此。

由于朱可夫及其学生的努力，俄罗斯科学院西伯利亚分院科学城创立的低温等离子体物理学派在俄罗斯和国际上得到承认，在乌克兰的基辅(Киев)、阿尔马塔(Алма-Ате)、比什凯克(Бишкеке)和圣彼得堡(Санкт-Петербурге)等很多城市都有低温等离子体学派。朱可夫花了很大的精力组织全苏联以及国际等离子体的讨论会和学术会议。1976~1995年，在近20年里，他领导了区域性西伯利亚计划，这是具有国家意义的科学研究和应用纲领长期规划，也是“新材料与工艺”的重要部分。这个部分包括两个重要的任务：在设计的方法、工艺上允许实现封闭循环经济(生态的)、环节少(节省能源)、过程快(节省金属)、自动化简单(省劳力)、新材料的机械设计；最大限度地促进高等学校人才的培养，包括出版专著、教科书、直接参加教学过程(演讲)。

对自己严格要求，对同事的意见高度尊重，专注科技进展，深切关心战友的命运。这就是朱可夫在西伯利亚科技社会中令人高度尊敬的实质。

目 录

译者序
前言
朱可夫传记

第一部分 关于朱可夫院士

第 1 章 人物、时代、事件	3
第 2 章 学生、同事及朋友对朱可夫的怀念	11

第二部分 低温等离子体发生器

第 3 章 等离子体发生器中紊流流动的一些理论问题	25
3.1 电弧紊流流动的层流化	25
3.2 自稳电弧长度的等离子体发生器理论	29
第 4 章 电弧等离子体发生器中阴极表面自稳定的数学模型	33
引言	33
4.1 数学模型	34
4.2 计算结果	37
结论	41
第 5 章 电弧等离子体阳极特性的数值分析	42
引言	42
5.1 模型	43
5.2 计算方法	45
5.3 阳极等离子体的计算特性	50
结论	55
第 6 章 在电弧放电阴极上的电流与传热	56
引言	56
6.1 热发射阴极在“反常发射”的工况下得到的一些基本实验规律	58
6.2 由金属向等离子体发射的电子、平衡的发射电流密度与电子的逸出功	61
6.3 在阴极上的最终电流密度	63

6.4 在热发射阴极上的能量平衡、近阴极的电位降	67
结论	70
第 7 章 水蒸气等离子体的电弧产生	71
7.1 水蒸气等离子体的“奇特性”	71
7.2 水蒸气等离子体电弧发生器的主要系统方案分析	74
7.3 水蒸气旋涡等离子体发生器的工作特性	77
7.4 气旋等离子体发生器的稳定工作条件	78
7.5 蒸汽旋涡等离子体发生器的动力特性总结	86
7.6 蒸汽等离子体的实际应用	94
结论	100
第 8 章 用于 CF₄ 的不同类型等离子体发生器的热性能和动力性能	102
8.1 直线等离子体发生器的研究	102
8.2 V 形等离子体发生器的研究	106
第 9 章 高频放电等离子体物理的研究及其实际应用	109
9.1 高频放电等离子体物理	109
9.2 高频放电等离子体诊断及发生在等离子体中的过程	115
9.3 高频放电在实际中的应用	118
第 10 章 模拟氩硅烷高频等离子体的化学成分	120
结论	123
第 11 章 带超声速气流的辉光放电等离子体发生器	124

第三部分 等离子体工艺过程

第 12 章 富勒烯与低温等离子体	139
12.1 什么叫富勒烯? 不长的历史	139
12.2 为什么富勒烯会引起这么大的兴趣	140
12.3 如何得到富勒烯	143
12.4 在电弧放电中富勒烯的形成	145
12.5 实验研究的结果	147
12.6 什么是含有富勒烯的炭灰	152
12.7 富勒烯生长过程的理论研究	158
第 13 章 利用等离子体发生器来研究超声速气流的控制	161
13.1 模型	162
13.2 等离子体发生器	164

13.3	实验结果	166
13.4	模型的跨声速绕流	168
13.5	实验方法	173
13.6	实验结果	175
13.7	测量结果的比较	178
13.8	实验结果与数值计算结果的比较	180
第 14 章	等离子体表面镀膜的成就	184
14.1	传统等离子体喷涂	184
14.2	空气等离子体喷涂	185
14.3	内部等离子体喷涂	186
14.4	超声速等离子体喷涂	187
14.5	多弧等离子体喷涂	188
	结论	189
第 15 章	基于等离子体喷涂理论和模型实验的合金水滴热物理碰撞机制	190
	引言	190
15.1	模拟物理的设备	192
15.2	形成金属氧化物“中间层”的理论基础	196
15.3	在金属基片上形成 YSZ “中间层”	200
	结论	208
第 16 章	合成与利用氮化硼领域中的新高潮	210
16.1	关于氮化硼的总论和在低压下合成立方氮化硼的相关问题	210
16.2	实验研究在立方氮化硼亚稳态合成基础上得到涂层	215
16.3	由硼混合物悬浮蒸气制成的氮化物膜化学涂层和碳氮化硼膜化学涂层	223
16.4	用 $B_3N_3H_6$ 热解氮化硼得到的气体涂层	225
16.5	俄罗斯学者在六方氮化硼工作中的重要贡献	226
16.6	作为合成硼化铝的材料是六方氮化硼	228
16.7	研究含硼体系的反应剂相互作用机制的结果	230
	结论	231
第 17 章	加工碳氢化合物原料的等离子体化学工艺、有毒废物的无害化和利用	232
	引言	232
17.1	加工含碳原料的等离子体化学过程的计算	233

17.2	由碳氢化合物原料得到乙炔	233
17.3	由煤生产乙炔	239
17.4	加工与利用化学生产过程中的废料	241
17.5	有毒的有机废物无害化	246
	结论	247
第 18 章	对固体废物的等离子体热加工	249
	引言	249
18.1	对火焰垃圾焚化工厂中形成的炉灰进行等离子体重熔	249
18.2	处理医用废物	253
18.3	用等离子体汽化处理环氧树脂废物	256
	结论	260
第 19 章	在燃烧煤粉的汽化过程中利用等离子体动力工艺改善生态及经济指标	261
	引言	261
19.1	等离子体动力工艺的基本原则和利用它改善燃料的性能	262
19.2	煤粉热电站所用等离子体燃料系统的实际方案	266
19.3	综合的等离子体汽化器是提高煤的活性和锅炉的生态指标的重要手段	275
19.4	等离子体汽化和综合加工动力煤	278
	结论	279
第 20 章	煤的等离子体热化学准备工艺中分子动力学及热力学计算	281
	引言	281
20.1	等离子体燃烧煤粉火炬稳定的计算	281
20.2	两级等离子体-煤喷嘴的计算	284
20.3	等离子体燃烧时的能耗和两级喷嘴中空气流量再分配的关系	289
20.4	煤的热化学准备过程的热力学特性计算	293
20.5	在煤热化学准备燃烧时计算等离子体发生器的比能耗与功率	295
	结论	300
第 21 章	将等离子体燃烧系统应用于水煤燃料的燃烧	301
	引言	301
21.1	点燃与燃烧水煤燃料的过程特性	301
21.2	在燃烧水煤时利用等离子体点燃系统	303
21.3	水煤的反应能力与燃烧稳定性	306

结论	307
第 22 章 借助等离子体化学产生纳米材料涂层的铸型和砂芯来提高铸件的品质	308
第 23 章 研究强脉冲高频场和金属及合金的相互作用	312
23.1 过程的模拟	313
23.2 过程的实验研究	321
第 24 章 等离子体发生器中圆柱阴极腐蚀的热机制	326
参考文献	335
结束语	369

第一部分 关于朱可夫院士

第1章 人物、时代、事件^①

1958年夏天，赫利斯坦诺维奇(С.А.Христиановича)院士通知我，要在新西伯利亚科学城建立理论与应用力学研究所，并且建议我领导一个有关气体放电等离子体的新方向，我完全同意他的建议。这个所的研究计划包括研究高速空气动力学、激波、磁流体力学、矿山岩土力学以及一些关于动力设备和等离子体的研究。

1958年12月，我第一次参观苏联科学院西伯利亚分院(Сибирское отделение, Академия Наук СССР)，并访问了正在建设的新西伯利亚科学城(Академгородок)，立即被那里的工作规模、深远的设想所震惊，同时也被参加建设的人们的忘我精神、非同寻常的热烈气氛所感染，他们的团队精神也令我感动。那时，我有很多机会和这个所的工作人员、西伯利亚分院的领导见面，他们的形象都深深地留在我脑海里。首先，我认识了特拉肥美科(А.А.Трофимуком)院士，在访问过金河谷(Золотая долина)以后，我做出了最后的决定——这次在新西伯利亚作短暂的停留。那时我想起了两个战争的片段：一个是从中央空气动力研究所撤退到新西伯利亚的时期，另一个是我与费特齐基根(Н.П.Ветчинкин)院士、阿波拉莫维奇(Г.Н.Абрамович)教授交往的过程。因为此后多年我们的工作不仅解决国防问题，而且还解决飞机涡轮发动机的远景问题。当时所有人只有一个目的：一切为了前线。

1959年1月1日，决定成立苏联科学院西伯利亚分院主席团，我被派往苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所(ИТПМ СО АН СССР)，担任电弧放电实验室主任。从那时起，我的科学兴趣就和等离子体气体放电的特性研究、低温等离子体及其应用联系在一起，并把它们应用在高温工艺的过程中。我们还建立了实验室，后来这个实验室也成为等离子体动力学蓬勃发展、培养高素质人员的基地，从这里诞生了理论与应用力学研究所和西伯利亚分院热物理研究所(Институт Теплофизики СО АН СССР)。从1958年开始，这些研究所迁到新西伯利亚航空研究基地(Сибирское НИИ)，由毕加林(Б.Б.Белянин)领导。他给我们这些所的成长提供了各方面的帮助，所长是助人为乐的典范，只要有事相求，他一定答应。实际上一年之后，我们就开始气体放电等离子体的理论与实验工作。在组织实验室以及建立等离子体动力学部的同时，我们也创造互助的氛围，这里有很

^① 截至1997年底收集的材料

多年轻的专家，他们来自全国各个大学，具有很强的独立工作能力，而且有自己鲜明的观点。一名现代学者最本质的东西应该是拥有独立的工作能力并愿意和他人建立一个团队，且从不侵占别人的劳动成果。对我们来说，最好的例子就是赫利斯坦诺维奇院士。他实际上创造了所有的科学思想。在这个研究团队里也有很多有创见的年轻专家。例如，扎可达止明斯基(Л.А.Заклязьмиский)、乌留科夫(Б.А.Урюков)、什马了可夫(В.Я.Смоляков)、奇马舍夫斯基(А.Н.Тимошевский)、达达诺夫(Г.Н.Б.Дандаров)、达托夫(Г.Ю.Даутов)、沙可诺夫(В.С.Соколов)、沙兹诺夫(М.И.Сазонов)、安沙达夫(А.С.Аньшакав)后来都成为科学博士以及新的学科方向的领导人。一些人成为大学校长，如沙可诺夫、达达诺夫。1959年3月，苏联科学院西伯利亚分院主席团任命我为副所长，负责科研工作。这不仅对西伯利亚分院很重要，而且对建立科学研究的将来方向、培养年轻科研人员也非常重要，我们与国立新西伯利亚大学联合，成立了气体动力学教研室。赫利斯坦诺维奇院士曾经领导这个教研室，在那里建设了行政大楼和气动力学大楼、压气机站和储气站。

1959年，理论与应用力学研究所曾经组织一个研究新型燃烧的实验室，由技术科学博士雷尔杜新(Н.А.Желтухин)领导。我们在20世纪50年代无数次相遇，而且和军事机关的专家如柯罗列夫(КБ С.П. Королева)讨论过很多问题，包括超声速火箭设备V-2等。^①

电弧放电物理实验室也成长得很快，因为我当时提出了，也是我在空气动力学1号实验室里得到的想法：研究低温等离子体并将其应用在气动力学中。1987年，当时我在西伯利亚分院工作，由于在空间技术方面的工作，我被授予卡拉列瓦(С.П.Королев)院士奖章。

空气动力学院在各个学科方向都取得进展，在苏联科学院西伯利亚分院的这种组织结构下，这些研究所群成为一些不同领域卓越学者接触的好地方，尤其是在起初工作时，连建立巨大科学基地的设想都可以在科学城里提出。这种良好氛围的形成要完全归功于我们的西伯利亚分院主席团。

研究所曾经与水利研究所、地理研究所、晶体研究所、矿山研究所、化学研究所等建立良好的关系，与一些城市大企业的领导建立联系，为理论与应用力学研究所的发展奠定了很好的基础，如列卡诺夫(В.Чкалова)航空工厂厂长瓦尔格(С.Г.Ванаг)、西伯利亚机械制造工厂(Сибселмаш)科托夫(Ф.Я.Котов)、化学中心(Химконцентр)符拉索夫(П.С.Власов)、西伯利亚电镀工厂(Сибэлектротерм)莫哈(В.П.Муха)等。我们在一起共同制定科研规划和经营方略，我们努力坚持一个重

^① 这里的信息材料是指1997年底的

要原则——研究所一定要市场化，把科学成果推向市场，反过来，他们的产品促进了理论与力学研究所研究方向的形成。

赫利斯坦诺维奇院士不止一次强调，在快速发展新西伯利亚生产能力的同时，应该按新的方式来组织它的科学研究。要做的事首先应该是客户所需要的。从一开始，研究所就成功地组织了各种各样的讨论会。在电弧放电实验室的物理实验中，他们很快就懂得把“集体的智力攻击”对准一些没有解决的或不清楚的问题(乍一下看来，这些问题在这个领域可能是足够“离奇”的)。

举两个例子来说明。1968~1969年，在研究增加等离子体发生器工作寿命这一课题的时候，我们用圆柱形的钨棒在氩气环境中放电，这样钨棒就会被腐蚀，我们发现在静止的阴极斑点里，腐蚀不是从电极端部开始的，而是从远离靠近弧的表面开始，而且与弧的表面有一段距离，所以在电弧燃烧1h后($I=100\text{A}$)阴极的长度不是减少而是增加。实验的数据看来有一点奇怪，所以科技界开始有人在学术会议上反对这些数据，认为这些数据不可信，而且以后的确发生了反复的现象。后来我和物理数学博士达达诺夫单独设计了一个含有钨棒的阴极回路，电流达到1000A，它的腐蚀比标准的阴极回路的腐蚀小三个量级。另一件怪事发生在1962~1963年。在研究氩气环境中靠近径向的电弧时，在圆柱底端出现了奇怪现象，这件怪事的本质在于用电影胶卷记录下来的现象，存在于一至两个或更多个电流通道的里。在很长一段时间内，这一现象被解释为电流与壁的分流现象。随着分流过程的进行，通电流的管道里存在很多量级的差异。经过几年的工作，技术科学博士奇马舍夫斯基发现这一现象的本质，指出在几个通流管道里的稳定性，阴极没有稳压电阻，在它附近有一定的热发射突台，它是压在铜阴极上，导致建立在独特的阴极，在它的通道上有很大的电流。

扎可达止明斯基、乌留科夫、什马了可夫、苏欣宁(Ю.И.Сухинин)总是积极地参与实验室的讨论，达托夫、弗里得别尔格(А.Э.Фридберг)、基舍尔(В.С.Кисель)、里别捷夫(А.Д.Лебедев)等也经常参加。讨论会经常持续几个小时，大家争得面红耳赤，每个人都希望发表自己的观点。

一些卓有成效的讨论总是令人难忘的。在格里格雷耶夫(В.Д.Григорьев)的领导下，实验室的设计师们(包括斯特连科(С.В.Стороженко))在1961年设计了第一个新西伯利亚的等离子体发生器，而且在西伯利亚科研中心里建立了等离子体实验台。在1962年，他们就可以研究一系列电弧放电的基本过程，这些放电都是发生在等离子体放电室里。多年以来，建立新型的有效的等离子体发生器的研究工作实际上是在理论与应用力学研究所进行的。1967年，苏联科学院院长克尔的什(М.В.Келдыш)院士视察了理论与应用力学研究所，随行的还有国家科技委员会主席克里宁(В.А.Кириллин)院士，他们对所里工作给予很高的评价，包括等离子体

部的工作。

此后，所里曾经讨论过几种复杂的理论模型。为了描绘流动管道里的电弧，考虑了等离子体磁流体动力学的不稳定性——足够复杂的现象，需要用概率论来描绘理论模型(乌留科夫、里别捷夫)，乌留科夫在这些结果的基础上建立了解决电弧理论的途径，就是在实验中找到一个研究层流中燃烧电弧理论的方法，该方法对建立系统弧的燃烧也是有效的，并能够建立电弧的紊流理论。

从 20 世纪 60 年代一直到 70 年代初，我们及一些国外的研究者都取得了大量成果。

在等离子体发生器中，物理过程及其数学描述极其复杂，这就产生了一个迫切的要求——对这些基础研究进行总结和思考。在相似理论和因次分析的基础上，我们得到了磁流体动力学方程组的一些物理过程的相似准则，这些过程发生在几乎相同的等离子体发生器中，电极有相同的极性，包括电源。这样就可以把等离子体发生器中的过程用一些共同的方法进行总结(这是由朱可夫和达托夫提出的)。这项工作于 1973 年底完成。库塔捷拉泽(С. С. Кутателадзе)院士及其学生是世界上最早应用我们研究成果的研究小组，用它总结出等离子体发生器的电弧伏安特性及热特性。

1993 年，西伯利亚分院热物理研究所等离子体动力学分部在广泛总结很多材料的基础上，分析了轴向等离子体发生器的积分电特性与热特性，并整理成能够进行直线型等离子体发生器工程计算的公式汇编。现在，这项工作已经完成，在显示屏上可以直接显示自动设计这种等离子体设备发生器与结构的系统。

1963 年 5 月，根据实验室的提议，在苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所所长赫利斯坦诺维奇院士的积极支持下，新西伯利亚科学城召开了第一届全苏等离子体发生器会议，这为当时全国在低温等离子体领域的专家力量的团结协作奠定了基础。从此，这个专业学术会议定期举行。为广泛吸引等离子体领域的专家及工业部门工程技术人员的参加，后续的学术会议轮流在苏联各加盟共和国的首都举行。例如，第三届全苏低温等离子体发生器会议在明斯克(Минске, 1967)举行，第四届在阿尔曼阿特(Алма-Ате, 1970)举行，第六届在伏龙芝(Фрунзе, 1974)举行，第十届——十周年特别纪念会在库纳斯(Каунасе, 1986)举行。

在漫长的 35 年间，共举行了 11 届全苏低温等离子体发生器学术会议。其中 3 届是国际会议，有来自美国、加拿大、法国、联邦德国、民主德国以及其他国家的学者参加。

在苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所等离子体动力学部迅速发展的同时，苏联国内外产生了许多等离子体的研究方向，后来成立许多独立的学派，带头人有乌留科夫教授(乌克兰)、日巴耶夫(Ж.Ж. Жеенбаев)院士和恩格坦

(В.С.Энгельшта)教授(吉尔吉斯斯坦)、全苏工程科学院的波洛托娃(А.В.Болотова)院士和马舍尔列(В.Е.Месерле)教授(哈萨克斯坦)、亚斯科(О.И.Ясько)教授(白俄罗斯)和达托夫教授(塔吉克斯坦)。除此之外,在解决问题时的视野开阔、考虑全面,加上紧密合作,我们的一些杰出领导人物之间一直保持联系,尽管大家工作在不同的科学技术领域和俄罗斯的不同城市,如技术科学博士乌留科夫教授、技术科学博士苏兹诺夫(М.И.Саонов)教授等。

举办学术性会议、专题讨论及出版这些会议、讨论会的论文集和会议录,扩大了我和国内外学者的接触范围。等离子体部的科技人员也成为国际会议的参加者、组织者,有的还成为国际等离子体刊物的编委,如朱可夫、苏罗连科(О.П.Солоненко)。

除了举办传统的全苏学术性会议和热等离子体的专题讨论会外,我们还系统地举办了西伯利亚区域性的等离子体发生器及其物理的讨论会。我们积极主动地与生产进行联系,在这段时间科学与生产之间不仅存在“分水岭”,而且还存在“双向运动的桥梁”。“分水岭”的作用是让学者能够深刻了解研究过程的物理本质、发现自然界新的现象、不断地积累科学潜能和完善技术方案。“双向运动的桥梁”就有可能准确解决现实存在的问题以及在生产中存在的远景问题,而且生产还能产生经济效益。在斯特鲁曼斯基(В.В.Струминский)院士领导苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所期间,我们在专利发明方面取得了很大的成就。

创造新的技术和有前景的工艺是最新成就“扩散”的基础,并从“扩散”的道路来看是无限的。但需要通过不寻常的途径来发展,科学和生产是一种双向主动的,带有一定风险的“扩散”。几十年来,我们一直在努力地实现这个思想——勇攀世界科技成就的最高峰,这是我们工作的主题。

在工作中,我们把任务紧紧支撑在“生根地区”这一有深远意义的决策上。这是由“西伯利亚”计划的拉弗连捷夫(М.А.Лаврентьев)院士提议和领导的(包括马尔丘克(Г.И.Марчук)、特罗弗里克(А.А.Трофимук)、多布连诺夫(Н.Л.Добренов)等院士)。

20世纪60年代末,等离子体工艺已经顺利应用于从裂解液态和气态碳氢化合物、重油及化工生产的废物中提取有用物质。后来才清楚,尽管我们是苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所的一个很大的研究部,但要保证实现这些工艺任务,力量还是不够的。20世纪70年代初,我们组建了一个专门的设计院——动力化学机械局(Энергохиммаш)(现在叫西伯利亚化学机械局(Новосибирск НИИХиммаш)。它的任务是设计工业实验用的等离子体技术设备的样机。这个部门由科研人员和设计师组成,他们先在苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所实习,我被任命为这个部门的科学领导人。

在赫利斯坦诺维奇(С.А.Христианович)院士之后,许多卓越的学者曾经担任过该所的领导。对于这个集体来说,领导的更迭,都有正面及负面的影响。每一位领导都对研究所的进一步发展方向有自己的想法,这是由不同领导的科学兴趣所决定的,这就等于有一股射流,促使集体用不同的方式处理问题,从而丰富了解决任务的方法。

任何一个研究所在财政上都要受国家预算的限制,因此总是要砍掉一些“旧”的方向,尽管这些“旧”方向仍有现实意义。

1966年,斯特鲁曼斯基院士被选为苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所的所长。在此以前,他曾经在中央空气动力研究所工作了许多年,是空气动力学领域的著名专家,他的工作方式是“急风骤雨”式的,并且非常固执。他到任后,立即把空气动力学领域的研究范围扩大,同时以最快的速度开始建造降低湍流的风洞,这不可避免地要砍掉一些已经形成且当时具有前景的方向。这时等离子体动力学部也积极地设计了用于跨声速风洞的大功率等离子体发生器。

1969年,政府的国家科学技术委员会(ГКНТ)颁布了集中科技力量于主攻方向的决定,这个决定也影响到苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所气体放电等离子体研究。考虑到在西伯利亚分院热物理研究所中有许多课题更接近能源研究,可以更直接地实现为国民经济服务的目的,而且在研究方法上也和莫斯科中央气动研究所研究等离子体的课题类似,西伯利亚分院主席团决定合并这两所的部分研究方向,在1970年2月把苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所的等离子体部划归西伯利亚分院热物理研究所。只在莫斯科中央气动研究所留下研究超声速风洞设计等离子体发生器的一个小组。

1963年,苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所等离子体部中出现了等离子体化学的研究方向。当时,在研究改进沙拉托夫化学联合企业(Саратовский химкомбинат,总工程师是列什特孟耶夫(Решетнев))的直线电弧等离子体发生-反应器时,发现可以利用天然气甲烷得到乙炔。类似的反应器首先在德国的工厂使用,然后是罗马尼亚波尔泽斯坦城(Румынии)和沙拉托夫(Саратов)。这个方向的研究取得了一些进展,还需要研究的是:在工业规模等离子体发生器中电弧燃烧的稳定性;电极的结焦及工作寿命;建造交流等离子体化学反应器的可能性及相应产生的其他课题。

1964年,等离子体化学方面的工作归入苏联科学院西伯利亚分院物理化学力学聚合所(ИФХИМС СО АН СССР,所长是技术科学博士列夫宁科),该所建立了等离子体化学聚合实验室(科技领导人是技术科学副博士科尔尼诺夫),主要研究如何得到各种材料的氧化物、碳化物和氮化合物的超细粉末(УДП)。很快,在等离子体部的领导下,来自阿尔马-阿塔动力研究所(波罗托夫教授)和冶金研究所

(卡列夫斯基教授)的专家也参加了这项课题,现在已有生产超细粉末的工业设备。

1968年,等离子体部的研究人员参加了第三届国际理论与应用化学学术性会议,并在会上报告了在等离子体化学领域的研究成果。

在开始组织苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所最初的10年,我们已经和科学院其他所接触并建立联系(等离子体化学实验室,波辽克(Л.С.Поляк)教授;气体研究所,莫斯科;基辅的研究所,列宁格勒的研究所及其他城市的研究所),而且也和许多工业企业和部门建立了合作关系(上述提到的沙托夫化学联合体,新西伯利亚“化工机械”,“西伯利亚电化工所”和国家化工委员会)。

在20世纪70年代末期,已在国内外获得广泛承认的西伯利亚热等离子体学派又开始描绘新的设想:虽然有大量的研究成果在国内外杂志上发表,但在大多数情况下,文章往往是“短命的蝴蝶”,仅仅起到信息传播的作用,为了等离子体学进一步的发展,需要出版专著。

当时,在世界科技文献中,还没有系统描述在等离子体发生器放电室中电-热物理过程的书籍。所以在1968年,等离子体部产生了出版专著的想法,这本专著在1973年出版,专著的名称是《气体电弧加热器》(等离子体发生器),作者是朱可夫、司马连科夫、乌留科夫,这本专著总结了西伯利亚等离子体部前十年实验的结果,即使在今天,这些工作也不失其科学意义。然后,又出版了《热等离子体的应用动力学》(朱可夫、克罗克耶夫、乌留科夫)。至今,这两本书对专家来说,仍是很好的指导教材,这反映了低温等离子体在物理和技术上的重要成果。

1969年,在等离子体部中产生了出版有关电弧放电等离子体三卷本的想法,这在苏联学者及国外同行中引起热烈反响,他们都积极参与。1977年出版的第一部分,反映了这一时期在苏联、美国、德意志民主共和国、德意志联邦共和国及其他国家研究课题的状况,而且指出进一步发展的方向。在最近许多年又出版了有关近电极过程、新材料、新工艺等方面一系列的专著,它们的基础都是等离子体。

为了总结等离子体部长期从事等离子体方面的研究成果,西伯利亚热物理研究所(Теплофизики СО АН СССР)准备出版20卷低温等离子体系列丛书,这也是在第十届全苏低温等离子体发生器学术性会议上讨论决定的(Каунас, 1986)。从材料内容与结构上看,这套丛书带有百科全书的性质,作者是由苏联国内的知名专家组成的庞大集体。现在看来,这不仅在苏联国内,在国际上也是绝无仅有的。在这一系列出版物中系统地总结了各个领域里已经取得的所有重要成果,既有理论的,也有应用的。

我想强调的是,这套丛书的最后一卷其价值非同一般。这要感谢苏联科学院西伯利亚分院主席团及其院士主席在精神上、物质上的支持,如果没有这些,现

在这本书还只能停留在手稿阶段。

直到现在，等离子体部的同事一共出版了 12 本专著、10 本参考书，发表了上百篇文章。

由于在研究气体放电等离子体过程中取得的成就和建造大功率直线低温等离子体发生器取得的功绩，1982 年，朱可夫、乌留科夫及其研究组同事获得了苏联国家奖；1985 年，由于“在高温下的热交换”方面的工作，朱可夫和鲁沙科夫 (В.П.Лукашов) 获得苏联科学院及捷克斯洛伐克科学院奖。

我衷心期望我们年轻的科技工作者好好审视已经走过的年代。正如古谚所说：“船不是经常有顺风，也没有固定的泊地。”同样，在科学中也没有那样容易的事，年轻的科技工作者一定要给自己提出明确努力的目标，学会独立工作，不怕碰壁。青年人工作要有创新，不要怕暂时的挫折，同时要学会和导师一起分析失败的原因，没有自我分析，就会重复犯错误，甚至丧失对工作的兴趣。青年人必须有广阔视野，并要学会耐心对待批评。

简单地回忆等离子体动力学部走过的道路，读者就会了解它的创立、在多方面的活动、如何建立国内外的接触和联系、如何把基础研究和解决实际任务综合起来。科学研究和人才培养相结合是研究部工作的基本原则，同时，在发展等离子体动力学部的优先任务和制定高水平的新工艺方面也带来重要贡献，并且极大地促进新专著、教材及论文集的出版。20 卷《低温等离子体丛书》的出版将为我们等离子体动力学部带来更辉煌的成就。

M. Ф. 朱可夫