



同济大学 1907-2017  
Tongji University



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

王洪昌 王占山 著

# 极紫外与软X射线多层膜 偏振元件研究

The Research of Multilayer Polarizing  
Components in Extreme Ultraviolet  
and Soft X-Ray



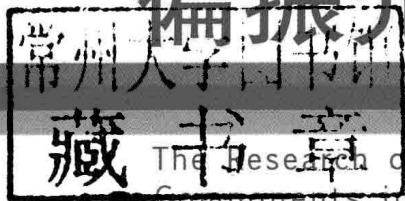
同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

王洪昌 王占山 著

# 极紫外与软X射线多层膜 偏振元件研究



The Research of Multilayer Polarizing  
Components in Extreme Ultraviolet  
and Soft X-Ray



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

针对极紫外和软 X 射线常规周期多层膜偏振元件带宽窄的测试困难的现状,本书首次提出了非周期多层膜宽带偏振光学元件的方法,克服了常规周期多层膜带宽窄、测试时元件需要平移或旋转的难题。

本书适合高等院校师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

极紫外与软 X 射线多层膜偏振元件研究 / 王洪昌,王占山著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 6932 - 2

I. ①极… II. ①王… ②王… III. ①光学元件—研究 IV. ①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090196 号

---

---

## 极紫外与软 X 射线多层膜偏振元件研究

王洪昌 王占山 著

出品人 华春荣 责任编辑 李小敏 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 8.25

字 数 165 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6932 - 2

---

定 价 44.00 元

---

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

# “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 騫
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 閻耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月



# 论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

# 前 言

极紫外和软 X 射线偏振测量开创了许多新的同步辐射实验方法, 如: 软 X 射线磁圆二色测量、软 X 射线元素分辨法拉第效应和克尔效应测量、自旋分辨的光电子和俄歇电子谱测量、磁畴显微镜、偏振散射测量以及软 X 射线偏振测量术等, 这些方法为生物、医学、信息、材料、物理与化学等学科提供了强有力的研究工具. 多层膜起偏器、检偏器和相移片是实现该波段偏振测量的关键元件. 目前, 美国、日本和欧洲已制成了可实用的多层膜偏振元件, 并获得应用. 我国对多层膜偏振元件一直缺乏系统研究, 致使无法开展该波段的偏振测量研究.

极紫外和软 X 射线常规偏振光学元件是周期多层膜, 本文探讨了其设计原理和方法, 成功制备了 Cr/Sc, Cr/C, La/B<sub>4</sub>C, Mo/Y, Mo/Si 反射式周期多层膜偏振元件和 Mo/Y, Mo/Si 透射式周期多层膜偏振元件, 保证了北京同步辐射偏振测量装置在线调试和偏振测量, 填补了我国在极紫外和软 X 射线波段偏振光学及其应用领域的空白.

针对极紫外和软 X 射线常规周期多层膜偏振元件带宽窄导致的测试困难的现状, 本书首次提出了非周期多层膜宽带偏振光学元件的方法, 克服了常规周期多层膜带宽窄、测试时元件需要平移或旋转的难题.

采用恰当初始膜系和局部优化算法相结合,将优化时间缩短至几十秒,大大提高了优化效率,完成了非周期多层膜宽带起偏器、检偏器和相移片设计.采用磁控溅射方法研制了非周期宽带偏振光学元件,实验中成功解决了薄膜沉积速率精确标定和非周期多层膜制作过程中膜厚的精确控制问题,制备了 13~19 nm 的 Mo/Si 与 8~13 nm 的 Mo/Y 反射式宽带多层膜起偏器(检偏器),和相应波段的宽角“起偏器”(检偏器)以及 Mo/Si 宽带相移片.

利用德国 BESSY 同步辐射的偏振装置实现了研制偏振元件的表征,测试主要结果为: Mo/Si 宽带多层膜在 15~17 nm, 14~18 nm, 13~19 nm 波段的平均反射率为 36.6%, 21.1%, 18.2%, 偏振度都大于 98%. Mo/Y 宽带多层膜在 8.5~10.1 nm, 9.1~11.7 nm 的平均反射率为 5.5%、6.1%, 偏振度大于 96%. Mo/Si 宽带相移片在 13.8~15.5 nm 波段,位相差平均值为 41.7°,透射率从 6%降至 2%.上述结果与设计值相符.通过拟合分析,得到了膜层的制备厚度以及粗糙度等参数.利用 Mo/Si 宽带反射式检偏器与宽带透射式相移片,首次完成了 BESSY 同步辐射 UE56/1-PGM 光束线的宽带全偏振分析,在 12.7~15.5 nm 波段测试结果与光源理论特性一致.

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 偏振光学元件的发展和研究现状 .....	2
1.3 极紫外和软 X 射线波段偏振光学元件应用 .....	8
1.4 课题研究背景和研究内容 .....	9
第 2 章 极紫外与软 X 射线多层膜偏振元件设计 .....	16
2.1 概述 .....	16
2.2 极紫外与软 X 射线周期多层膜偏振元件设计 .....	17
2.3 极紫外与软 X 射线非周期多层膜偏振元件设计 .....	25
2.3.1 宽带及宽角多层膜偏振光学元件膜系初始结构 推导 .....	25

2.3.2	极紫外与软 X 射线多层膜宽带偏振元件设计	30
2.3.3	极紫外与软 X 射线多层膜宽角偏振元件设计	38
2.3.4	极紫外与软 X 射线非周期透射多层膜偏振元件设计	44
2.4	本章小结	47
<b>第 3 章</b>	<b>极紫外与软 X 射线多层膜偏振元件制备与检测</b>	<b>48</b>
3.1	概述	48
3.2	溅射原理及磁控溅射设备简介	49
3.3	X 射线衍射仪(XRD)	52
3.4	合肥国家同步辐射实验室(NSRL)反射率计	55
3.5	北京同步辐射装置(BSRF)偏振测量装置	56
3.6	德国柏林同步辐射实验室(BESSY)偏振测量装置	57
3.7	其他检测方法	59
3.8	本章小结	62
<b>第 4 章</b>	<b>极紫外与软 X 射线多层膜偏振元件测试结果与分析</b>	<b>63</b>
4.1	概述	63
4.2	XRD 小角衍射测试	64
4.3	NSRL 反射率测试结果	69
4.4	BSRF 偏振测试结果	71
4.5	BESSY 偏振测试结果	73
4.5.1	反射式周期多层膜偏振元件测试结果	73
4.5.2	透射式周期多层膜偏振元件测试结果	79
4.5.3	反射式 Mo/Si 非周期多层膜偏振元件测试结果	81

4.5.4 反射式 Mo/Y 非周期多层膜偏振元件测试结果	88
4.5.5 透射式 Mo/Si 非周期多层膜偏振元件测试结果 与分析	94
4.6 本章小结	103
<b>第 5 章 总结</b>	104
5.1 主要研究成果	104
5.2 主要创新点	105
5.3 需要进一步解决的问题	106
<b>参考文献</b>	107
<b>后记</b>	114

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 概 述

光的偏振是指光的振动方向不变(线偏振),或电矢量末端在垂直于传播方向平面上的轨迹呈椭圆(椭圆偏振)或圆(圆偏振)的现象. 1704—1706年,牛顿最早把偏振的概念引入光学. 1809年,马吕斯首先提出光的偏振,并在实验室发现了入射到偏振片上的线偏振光,及其透射光强度的变化规律(马吕斯定律). 1815年,布儒斯特发现自然光在电介质界面上反射和折射时,当入射角的正切等于媒质的相对折射率时,反射光线将为线偏振光(布儒斯特定律). 1865—1873年,麦克斯韦建立了光的电磁理论,从本质上说明光是横波,其振动方向和光的传播方向垂直. 法拉第(1845年)与科尔(1876年)发现了磁性体和光相互作用而表现出的磁光效应,进一步验证了光的电磁波特性.

使用偏振光可以开展许多实验来研究材料的特性. 为定量分析物理过程,需要起偏器、检偏器和相移片等偏振光学元件,这些元件还可以用来测量光源的偏振特性,实现线偏振光与圆偏振光之间的相互转换. 从可见光到硬 X 射线波段,根据材料的光学特性,选择合适的材料作为偏



振元件,开展了相应的偏振研究方法,如图 1-1 所示。

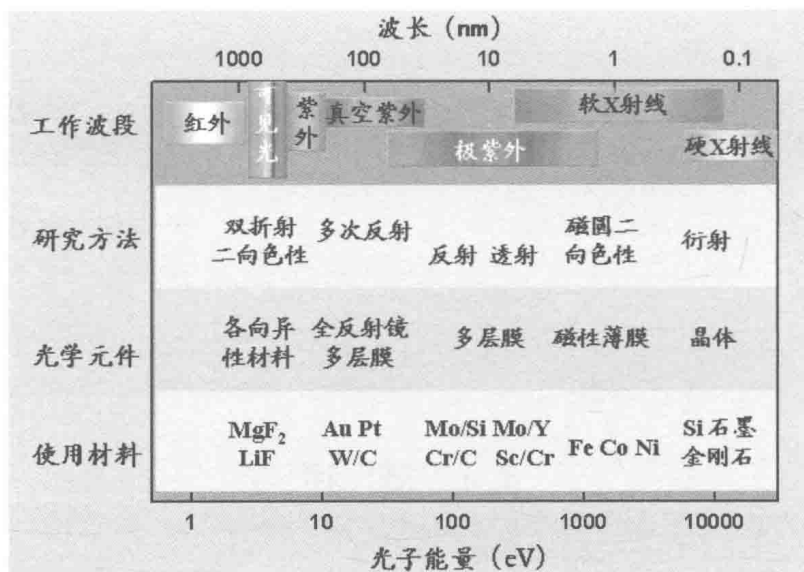


图 1-1 在不同波段,选择的偏振分析方法、光学元件及使用材料

## 1.2 偏振光学元件的发展和研究现状

在可见光(400~800 nm)和紫外光(190~400 nm)波段,可以用透射材料的二向色性和双折射特性制成起偏器、检偏器和相移片<sup>[1]</sup>. 二向色性为材料对偏振光的平行分量和垂直分量具有不同的吸收特性;双折射为各向异性的晶体对一束入射光产生折射率不同的两束光(o光和e光)的现象. 因此二向色性是由材料光学常数的虚部各向异性引起的,而双折射则体现了材料光学常数的实部的各向异性. 利用双折射原理制成尼克尔棱镜和沃拉斯顿棱镜,工作原理如图 1-2 所示,沃拉斯顿棱镜可以得到 o 光和 e 光,但是尼克尔棱镜只能得到 e 光.