

# 软X射线与 极紫外辐射的 原理和应用

[美] D.阿特伍德 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 软 X 射线与极紫外辐射的 原理和应用

[美]D. 阿特伍德 著  
张 杰 等 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2000-4334号

## 内 容 简 介

这本自成体系的综合教科书主要介绍软 X 射线与极紫外(EUV)辐射的基本特性,讨论它们在多个领域的广泛应用,包括用于半导体芯片制备的极紫外光刻和生物样品的软 X 射线显微。

本书由辐射、散射、波的传播、衍射、相干等相关的基本原理的阐述作为开始,然后讨论了与软 X 射线与极紫外辐射相关的许多现象和应用。为了满足尽可能多的读者的需要,本书的每一章都从重要结果和概念的总结开始,紧接着是几乎没有数学公式的引言,随后是所讨论主题的详细数学演绎。本书的内容涉及极紫外光刻、生物显微术、光谱显微术、极紫外天文学、同步辐射、高温高密等离子体物理以及软 X 射线激光。

本书还提供了大量有用的参考资料,如电子束束缚能、特征发射线和光吸收截面的数据等。本书对于在工程、物理、化学和生命科学等领域工作的研究生和专业人员是非常有用的。同时它对于实际从事半导体制备和材料科学的工程师也是不可缺少的参考书。

Attwood D. T. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications, Cambridge University Press, 1999  
ISBN 0-521-65214-6(hbk.)

### 图书在版编目(CIP)数据

软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用/(美)阿特伍德著;张杰等译. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-010813-2

I. 软… II. ①阿… ②张… III. ①X 射线-研究 ②紫外辐射-研究 IV. O434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 079447 号

责任编辑:张邦固 / 责任校对:柏连海  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年9月第一次印刷 印张:29 3/4 插页:1

印数:1-2 000 字数:577 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 中文版序言

本书是对作者多年在加州伯克利大学讲授的同名课程的一个总结。本书主要介绍短波长辐射(极紫外和软 X 射线波段的电磁波)的物理和相关应用,所涉及的光谱范围是从 0.3nm(3Å)到大约 40nm 的极紫外至 X 射线波段,相对应的光子能量是从 30eV 到几千电子伏。这个波段的研究和应用之所以进展缓慢,是因为所有材料在这个波段都有非常明显的吸收。近年来这个波段对于科学和技术发展的重要性正在迅速显示出来。这种比 520nm 的绿光和 250nm 的紫外线波长更短的辐射,可以使人们利用软 X 射线显微看到更微小的结构,也可以让人们通过极紫外平版印刷描绘精细的图案。这样的极紫外平版印刷是目前到 2010 年这段时间大规模印刷用于 20GHz 计算机的集成电路的主要技术。这个波段的光子能量可以选择激发周期表上大多数元素的原子共振能级,这也就是所有材料都在这个波段都有显著吸收的原因。利用这个特点,可以探测薄膜、生物细胞以及纳米结构中的特定元素。

本书回顾了短波长辐射的基本电磁理论,极紫外/软 X 射线光源的物理背景,比如相对论性电子的同步辐射,高温高密等离子体发射,以及极紫外/软 X 射线激光等;本书还介绍了这一波段的光学元件,例如多层干涉镀膜(multilayer interference coatings)、衍射波带片透镜和光栅、掠入射反射镜以及它们在显微,平版印刷术,极紫外天文学和表面科学方面的应用。这个新兴领域给许多具有扎实物理基础的年轻人提供了展示自己才华的舞台。

我极为高兴的得知张杰教授,一位工作在 X 射线激光国际前沿的研究者,愿意把本书翻译成中文。我深知这是一项巨大的工程,它要求翻译者对此领域的物理和技术有深厚的理解和很高的造诣。我深深地感激张杰教授,他在领导他的极其富有创新精神的北京研究组进行国际前沿工作的同时,为本书的翻译付出了宝贵的时间和巨大的努力。我相信中文版的读者一定会和我一样,感谢他和他的同事为本书的翻译所作出的贡献。

作者

于加州伯克利

2003 年 5 月

## 译者的话

1998年7月,我在日本京都参加第六届X射线激光国际会议。在会上我代表徐至展、王世绩先生,代表我国的X射线激光界做了大会邀请报告。报告结束后,David Attwood教授来找我,他告诉我,他正在写一本有关软X射线与极紫外辐射的书,在书中两个章节里他分别详细介绍了我在复合泵浦X射线激光方面的工作(J Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. 1995)以及我在类镍X射线激光的饱和输出方面的工作(J Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. 1997, J Zhang *et al.*, Science 1997)。他说书的初稿已经完成了,如果我愿意的话,他可以将初稿给我寄来让我提提意见,并请我将此书的内容介绍给中国的读者。我当时以为是句客气话,没有多加考虑就一口答应下来。

没有想到翻译一本书的工作量会如此巨大。感谢我的学生苍宇、李玉同、王薇、董全力、陈正林、滕浩以及清华大学工程物理系来我们实验室做小学期实习的王琪和余慧莺同学,他们在本书的翻译过程中提供了巨大的帮助。尤其要感谢赵理曾和李赞良两位老师,他们仔细校对了译稿的每一个章节,本书中的每一句话,每一个专业词汇的标准译法都倾注了他们大量的心血。

特别要感谢小卢,她的细心核对和认真的安排极大地提高了本书的质量。

与剑桥大学出版社关于版权的谈判出奇地容易,在我们解释了我们的翻译此书的动机和目前的进展以后,剑桥大学几乎立刻就同意转让版权。而且,为了表示他们对翻译的支持,剑桥大学出版社只收取了500英镑的版权转让费。

国外最好的专业书籍的引进对于我国年轻一代的科研人员和学生来说,是非常重要的,但是,在我着手翻译这本书以后,我才明白为什么极少有工作在第一线的科研人员翻译专业书籍。单从时间上来说,在繁忙的科研工作中,的确很难抽出额外的时间来进行翻译工作。为此,我强迫自己,每天一定要挤出至少1个小时用于此书的翻译。为了翻译这本书,我常常早晨6点物理所大楼一开门就来到办公室,晚上则常常要工作到12点物理所大楼锁门。

我现在正在俄国圣彼得堡光学研究所进行为期三天的访问。出国访问期间,是我最能静下心来做事情的时候。我又将本书的几章进行了润色。想到这本书终于翻译完了,一身轻松。虽然是翻译,但在很多方面,的确比自己写书的难度有过之而无不及。这本书中凝聚着我和我的同事们的期望,希望读者们能从这本书的阅读中有所收获。

张 杰

2001年9月2日于圣彼得堡

• iii •

## 前 言

本书旨在介绍软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用。本书所讨论的短波长辐射位于电磁波谱上紫外(在日常生活中我们通常将紫外线与皮肤晒黑联系)与硬 X 射线(在日常生活中我们通常将硬 X 射线与医学和牙科成像联系起来)之间的波段。由于在各种物质中的无数原子共振和随之引起的短吸收长度(典型地约为一微米或更短),波谱中的软 X 射线/极紫外区域一直发展得比较慢。然而,这个光谱波段给科学和技术提供了很大的机会,这个波段里的波长要比可见光或紫外辐射短很多,因此用这个波段的显微镜可以看到更小的结构,用这个波段的光刻可以写下更精细的图案。而且,在这个波段中像高空间分辨率的透镜和高反射率的镜片这样的光学技术已经得到了充分的发展,使得利用这个波段甚至可以做到在更短的波长都还不可能的事情。在软 X 射线/极紫外谱区中的光子能量正好基本上与几乎所有元素的主要共振线匹配。虽然这导致了非常短的吸收长度,典型地是一个微米或者更短,但是正是这个波段为元素和化学分析提供了非常精确的方法,例如在表面和环境科学中就是使用这个波段来进行元素和化学分析的。有趣的是,在低于氧吸收边的谱区中,水是相当透明的,这为在 284eV 到 543eV 的光谱“水窗”中对含碳物质成像提供了一个天然的对比机制。这为生命科学和环境科学提供了非常有趣的新机会。

对这个光谱波段的研究是最近的事情。至今,关于软 X 射线和极紫外辐射以及这个光谱波段的界限还没有普遍认同的定义。在此我们遵循天文学界、光刻学术界、大部分的同步辐射学术界和等离子体物理学术界所共同认可的标准:极紫外辐射是指光子能量从大约 30eV 到 250eV(波长大约从 40nm 到 5nm)的辐射;软 X 射线则是从大约 250eV(恰低于碳的 K 吸收边)延伸到几千电子伏特(波长从 5nm 到 0.3nm)的辐射。这个波段在谱的低能端与紫外辐射的重叠部分,以及在高能端与 X 射线辐射的重叠部分则还没有很好的定义。为了使大家对这个波段的光子能量有个更清楚的概念,我们以常见的绿光为例,绿光是指光子能量为 2.3eV 和波长在 530nm 左右的辐射。在这个波段的最新进展涉及到科学和技术两方面,它们是以共生的关系相互支持、相互促进。特别值得指出的是近年来电子工业界方面的纳米加工技术的巨大进步。目前的纳米加工技术已经可以提供轮廓分明的结构,其特征尺寸与本书所讨论的波长相同。在材料科学方面近年来在多层膜的制备方面的进展也是极为重要的。

本书适合物理、化学、工程和生命科学方面的研究生和专业人员阅读。它是我去 14 年来在加利福尼亚大学授课的精华结晶。授课的对象是应用科学和技术、

电子工程和计算机科学、物理、化学、材料科学、核工程以及生物工程方面的博士生。某些情况下也有本科生。这些科学背景的差异使得这本书成为了适用于交叉学科研究的教科书。本书内容是广泛的,包含电磁理论的基本知识、各种辐射源、光学元件以及应用等各个方面的知识。本书的第一章通过回顾有关的原子物理和电磁理论的基础知识,使读者对 X 射线与极紫外辐射有了最基本的了解。接下来的章节依次介绍多层膜光学元件及其在材料科学和极紫外天文学中的应用;同步辐射和波荡器辐射;激光产生的等离子体;极紫外和软 X 射线激光器;短波长干涉;波带片透镜和它的衍射光学元件以及在生物显微术、材料显微术和纳米结构的图形;最后一章是关于利用极紫外和软 X 射线光刻对将来的特征尺寸小于 100nm 的电子器件的大批量生产的讨论。

由于本书的内容实际上非常广泛,所以它可以被最广泛的读者群所接受。本书的每一章都以简短概述与主题有关的材料和要点以及一些有选择的方程作为开始,以刺激读者学习科学知识的欲望。大部分章节都有引言部分,这是专为不熟悉此领域的读者设计的,包括启发式的讨论和阐明基本概念の説明。针对该章主题特别感兴趣的研究生和专业人员,每章也包含了方程的数学推导。为了使读者能够不费力地跟上这些数学推导,矢量计算和傅里叶变换方面的本科生训练是必要的。每一章都紧密结合了对当前极紫外和软 X 射线辐射在物理和生命科学中应用的介绍。尽管有严格的数学推导,读者也可以在每一章阅读了引言部分了解了重要概念后,直接跳到应用部分。家庭作业思考题是为了增强对本书内容的理解,使读者熟悉本书的单位和量级,并了解各种公式在当前应用的重要性,这些家庭作业思考题可以在网址 <http://www.coe.berkeley.edu/AST/sxreuv> 上找到。

本书提供了 600 多个参考文献,作为现代研究和应用的切入点。为了使这本书发挥它的参考价值,很多比较重要的方程都被包括进来了。某些情况下为了方便地当作手册使用,这些方程以带有相同单位的数值的形式重复出现。附录包括电子束缚能表,特征发射线表,很多元素的实数和虚数散射因子的表格和图,计算光吸收截面的图,最新的物理常数表,以及一些简便的矢量和数学关系式。附录还概述了国际单位制(SI),列出在这个领域常用的导出单位及换算因子。

作者

加州大学伯克利分校

1999 年 6 月

## 致 谢

很高兴能借此机会感谢 Rudolf (Bob) Barton 和 Linda Geniesse 持续多年的努力。Bob 打印并编辑了文稿的好几个版本, 仔细处理了所有的方程, 并在我多次修改时表现出了高度的耐心。我的妻子 Linda 负责所有的插图和创作了全部的艺术示意图, 我相信这将有利于读者对问题的理解。当我们为了更清楚地表达而多遍修改这些原图时, 她也显示出了超乎寻常的耐心。

本书的主要内容直接来自作者在过去的十四年中的十三年里在加州大学伯克利分校的授课笔记, 因此, 本书的内容、形式和细节的程度都受到了学生很大的影响。他(她)们对问题的探索、课堂讨论、偶尔的疑问表情、所做的家庭作业、关键性的劝告以及在学期末的建议都影响了本书的每个部分。我在这里深深感谢他(她)们的贡献。特别希望感谢以下人员的特殊贡献: Kosta Adam, Junwei Bao, H. Raul Beguiristain, Kevin Bowers, Matt Brukman, Chang Chang, Gregory Denbeaux (Duke 大学), Eric DeVries, Daniel Finkenthal, Andrea Franke, Qian Fu, Ernie Glover, Kenneth Goldberg, Susanna Gordon, Joseph Heanue, Ronald Haft (UC Davis), John Heck, W. R. (Tony) Huff, Nasif Iskander, Ishtak Karim, Chih-wei Lai, Luke Lee, Sang Hun Lee, Yanwei Liu, Martin Magnuson (Uppsala 大学), Edward Moler, Vladimir Nikitin, Khanh Nguyen, Tai Nguyen, Tom Pistor, Nen-Wen Pu, Richard Schenker, Robert Socha, Regina Soufli, Alan Sullivan, Edita Tejnil, Akira Villar, Max Wei, Yan Wu, and Andrew Zenk。

本书也从我的远近同事们那里获益匪浅。准备讲义时我从劳伦斯伯克利国家实验室 X 射线光学中心的同事们那里得到了建议和一些解释。James Underwood 在本书的许多地方提供了原始材料和有用的信息, Eric Gullikson 修正了用于文中的许多图表, 现在 Argonne 国家实验室和芝加哥大学的 Kwang-Je Kim 在有关同步辐射的内容方面对我进行了耐心的指导, Werner Meyer-Ilse, Stanley Mrowka, Erik Anderson, Jeffrey Bokor (也在加州大学伯克利分校), Patrick Naulleau 和 Kenneth Goldberg, 他(她)们都在各自所擅长的领域为本书作出了贡献, 其中几位还阅读了本书特别的几章, 并提供了重要的反馈信息。加州大学伯克利分校的 Michael Lieberman 也阅读了最初的几章, 并提供了反馈。第二章和第六章的部分内容来源于那时还在纽约大学的 Nathan Marcuvitz 的讲义。

许多更遥远的其他同事也通过审阅、建议等方式赐益于本书。为此, 我要感谢 Ingolf Lindau (Stanford and Lund 大学), Bernd Crasemann (Oregon 大学), Joseph Nordgren (Uppsala 大学), David Windt (Lucent 科技大学), Claude Montcalm (利弗



莫尔国家实验室), Eric Ziegler(ESRF), Alexandre Vinogradov(列别捷夫物理研究所), Albert Hofmann(CERN), R. Paul Drake(密西根大学), R. Kauffman(利弗莫尔国家实验室), Andrei Shikanov(列别捷夫物理研究所), Luiz DaSilva(利弗莫尔国家实验室), Syzmon Suckewer(普林斯顿大学), Jorge Rocca(科罗拉多州立大学), Emil Wolf(罗切斯特大学), Giinter Schmahl(哥廷根大学), Janos Kirz(SUNY, Stony Brook), Alexei Popov(Instit. Terr. Magn. Iono. Rad. Prop., Troitsk), Franco Cerdna(威斯康星大学), Donald Sweeney(利弗莫尔国家实验室), Richard Stulen(圣地亚), Hiroo Kinoshita(Himeji 大学), Victor Pol(摩托罗拉), David Williamson(SVGL), and Frits Zernike。

最后,我要感谢那些对我在伯克利的研究和教学中给予支持的人和公司,这包括能源部办公室的 Louis Ianiello, Iran Thomas, William Oosterhuis 和 Jerry Smith, 空军科学研究办公室的 Howard Schlossberg, 他多年来一直支持我们小组的学生所从事的科学研究, David Patterson, 他领导 DARPA 的“先进光刻规划”, 以及英特尔、摩托罗拉和高级微器件公司等。特别需要感谢的是英特尔公司的 John Caruthers 对这些活动和这本书的不间断地支持。感谢 Daniel Chemla 的支持和鼓励, 没有这些, 将不可能在教学、咨询和写作一本长书的同时, 维持我自己的活跃的研究组。

作 者

加州大学伯克利分校

1999年6月



作者和译者在伯克利校园的合影

# 目 录

第一章 引言	1
1.1 电磁波谱中的软 X 射线和极紫外波段	1
1.2 基本的吸收和发射过程	4
1.3 原子能级和允许跃迁	9
1.4 电磁辐射的散射、衍射和折射	17
参考文献	19
第二章 极紫外和软 X 射线波段的辐射和散射	23
2.1 麦克斯韦方程组和波动方程	23
2.2 散射场的计算	26
2.3 辐射功率和坡印亭定理	31
2.4 散射截面	34
2.5 自由电子的散射	35
2.6 束缚电子的散射	37
2.7 多电子原子的散射	40
参考文献	47
第三章 极紫外和软 X 射线波段电磁波的传播和折射率	49
3.1 波动方程和折射率	49
3.2 波传播的位相变化和吸收	54
3.3 界面上的反射和折射	58
3.4 软 X 射线与极紫外辐射的全反射	60
3.5 界面的反射系数	62
3.5.1 $E_0$ 与入射面垂直	63
3.5.2 $E_0$ 与入射面平行	67
3.6 布儒斯特角	70
3.7 近临界角附近场对有损耗介质的渗透	72
3.8 $\delta$ 和 $\beta$ 的决定:Kramers-Kronig 关系	79
3.9 掠入射光学的应用	83
3.10 周期结构增强的反射率	84
参考文献	84
第四章 多层干涉膜	86
4.1 引言	86

4.2	散射辐射的相长干涉	87
4.3	多层镜反射的计算模型	91
4.4	多层膜的制备	94
4.5	多层膜光学的应用	95
4.5.1	表面科学中的软 X 射线与极紫外光发射显微术	95
4.5.2	极紫外与软 X 射线天文学	97
4.5.3	极紫外光刻	99
4.5.4	等离子体诊断	100
4.5.5	磁性材料的极化研究	102
4.5.6	软 X 射线微探针	104
	参考文献	107
<b>第五章</b>	<b>同步辐射</b>	<b>111</b>
5.1	引言	112
5.2	偏转磁铁辐射的特性	116
5.3	波荡器辐射的特性	122
5.3.1	波荡器辐射图样	124
5.3.2	中心辐射锥	126
5.4	波荡器辐射:辐射功率、亮度和谐波的计算	128
5.4.1	波荡器方程	128
5.4.2	关于波荡器谐波的简述	132
5.4.3	中心辐射锥中的辐射功率	134
5.4.4	随角度变化的功率和总功率	148
5.4.5	波荡器辐射的谱线宽度	153
5.4.6	波荡器辐射的谱亮度	157
5.4.7	时间结构	160
5.4.8	波荡器辐射的偏振性质	162
5.5	磁偏转参数 $K$ 对谐振运动的影响	164
5.6	从波荡器辐射转变到扭摆器辐射	169
5.7	扭摆器辐射功率与通量	174
5.8	飞秒脉冲的产生	176
	参考文献	177
<b>第六章</b>	<b>高温高密等离子体物理</b>	<b>181</b>
6.1	引言	182
6.2	等离子体中的短程和长程相互作用	184
6.3	描述等离子体的基本参数	187
6.4	等离子体的微观运动学和流体描述	189

6.4.1	微观描述	189
6.4.2	运动学描述	192
6.4.3	流体描述	194
6.4.4	等离子体膨胀	201
6.4.5	电子声波	202
6.4.6	离子声波	206
6.4.7	等离子体中的电磁横波	208
6.4.8	共振吸收	214
6.4.9	磁化等离子体中的波	215
6.4.10	等离子体中的非线性过程	215
6.4.11	非线性过程的阈值	219
6.5	数值模拟	221
6.5.1	粒子模拟	221
6.5.2	等离子体质量与能量输运的拉格朗日带计算	223
6.6	密度梯度:紫外和极紫外探针	225
6.7	高温高密等离子体的 X 射线发射	229
6.7.1	连续辐射与黑体辐射谱	230
6.7.2	线发射与电离瓶颈	233
6.7.3	亚千电子伏特的线发射与连续发射	237
6.7.4	几千电子伏特的线发射	243
6.7.5	超热 X 射线	245
6.7.6	激光波长趋势	246
6.8	飞秒激光脉冲的高次谐波产生	248
	参考文献	251
<b>第七章</b>	<b>极紫外与软 X 射线激光</b>	<b>257</b>
7.1	基本过程	257
7.2	增益	265
7.3	用复合机制在类氢碳离子中产生激光	269
7.4	碰撞泵浦类氦和类镍离子产生激光	273
7.5	小型极紫外激光器	282
	参考文献	286
<b>第八章</b>	<b>短波长相干</b>	<b>291</b>
8.1	时间相干性和空间相干性的概念	292
8.2	需要相干性的一些例子	297
8.3	空间滤波和谱滤波	300
8.4	波荡器辐射的空间滤波和时间滤波	301

8.5	空间相干的极紫外和软 X 射线激光	310
8.6	范西泰特-泽尼克定理	312
8.7	用短波长产生高反衬度条纹的例子	321
	参考文献	324
<b>第九章</b>	<b>衍射光学与软 X 射线显微术</b>	<b>329</b>
9.1	引言	330
9.2	菲涅耳波带片透镜	335
9.3	针孔与波带片对辐射的衍射	341
9.3.1	针孔	342
9.3.2	波带片	344
9.4	波带片透镜的空间分辨率	348
9.5	焦深与谱带宽度	352
9.6	超过瑞利极限的空间分辨:有效的角照明轮廓	354
9.7	高分辨率软 X 射线显微术	356
9.7.1	软 X 射线显微镜	357
9.7.2	扫描软 X 射线显微镜	358
9.8	在生命科学上的应用	359
9.8.1	软 X 射线显微镜在生物学上的应用	363
9.8.2	扫描软 X 射线显微镜在生物学上的应用	369
9.9	在物理学上的应用:用于材料科学和表面科学、空间分辨率低于 100nm 的分析工具	371
9.10	波带片制作	377
	参考文献	388
<b>第十章</b>	<b>极紫外与 X 射线光刻</b>	<b>396</b>
10.1	深紫外(DUV)及更短波长的光刻	397
10.2	极紫外光刻	405
10.3	X 射线贴近式光刻	409
	参考文献	414
<b>附录</b>		<b>420</b>
A	单位与物理常数	420
A.1	国际单位制(SI)	420
A.2	物理常数	422
	参考文献	422
B	电子束缚能、K 壳层和 L 壳层的主发射线以及俄歇电子能	423
	参考文献	429
C	原子散射因子、原子吸收系数和亚壳层光电离截面	430

参考文献	440
D 数学与矢量关系	440
D.1 矢量与张量公式	440
D.2 级数展开	440
D.3 三角关系	442
D.4 定积分	443
D.5 复变函数	443
D.6 傅里叶变换	445
D.7 狄拉克 $\delta$ 函数	445
D.8 柯西主值定理	446
参考文献	446
E $k, \omega$ 空间的一些积分公式	447
F 洛伦兹时空变换	450
F.1 频率与波数关系	451
F.2 角度变换	453
F.3 长度的洛伦兹收缩	454
F.4 时间膨胀	455
F.5 从 $dP'/d\Omega'$ 变换到 $dP/d\Omega$	455
参考文献	458

# 第一章 引言

## 1.1 电磁波谱中的软 X 射线和极紫外波段

在电磁波谱中对从紫外到 X 射线波段的辐射的研究是最晚的。在电磁波谱的图表上,这段波段一般被显示为黑暗区。正是在这个波段里,存在着大量的原子共振线辐射,因而会使得辐射在很短的距离内被吸收,在物质中的典型吸收长度为纳米(nm)或微米( $\mu\text{m}$ )量级。由于历史原因所限,对这个区域的探索和研究一直没有深入开展。另一方面,正是这些共振线辐射为元素(C,N,O 等)和化学(Si,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiSi}_2$  等)鉴定提供了方法,并为科学和技术的进一步发展创造了机会。而且,由于波长相对较短,利用这个波段的辐射既可以用显微镜看到更为微小的结构,还可以光刻出更为微小的图样。对这样的可能性的研究需要在相关领域的(比如在材料科学和纳米加工方面)技术突破。这反过来又会产生新的科学认识,也许通过表面科学、化学和物理,促进现有技术的进步。对极紫外和软 X 射线光谱区的研究目前正处在一个快速发展和科学与技术相互促进的时期。

图 1.1 显示了电磁波谱的一部分——从红外延伸到 X 射线区,它们所对应的波长标在图的顶部,它们所对应的光子能量标在图的底部。图中所显示的主要的光谱区域是红外区(IR),它与分子的共振线和热辐射相联系;从红到紫的可见光区,与颜色和视觉相联系;紫外区(UV)与日灼和电离辐射相联系,而极紫外(EUV)和软 X 射线(SXR)区即这本书的主题;最后是硬 X 射线区,与医学和牙科用于诊断的 X 射线相联系;同时通过使用衍射和其它技术,硬 X 射线区也与晶体、材料和生物学样品的科学分析相联系。

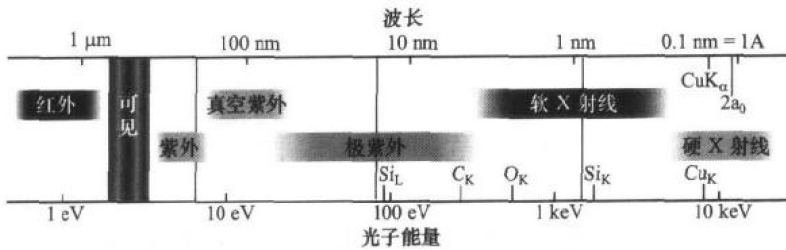
如图 1.1 所示,极紫外区是指光子能量从约 30eV 到约 250eV 的区域,相应的真空波长约为 5nm 到 40nm\*。软 X 射线区是指光子能量从约 250eV(恰好低于碳的 K 吸收边)到十几个千电子伏的区域,如图 1.1 所示。这些光谱区是以原子的主要共振线和大多数小原子序数( $Z$ )和中等原子序数( $Z$ )的元素的吸收边为主要特征的(这里  $Z$  是原子序数,即核内的质子数)。表 1.1 给出了一些常见元素的主要原子吸收边\*\* 和光子能量为 100eV 到 1keV 的  $1/e$  吸收长度。K 和 L 吸收边分

---

\* 在这个光谱区通常用电子伏特(eV)或千电子伏(keV)来表示光子能量。光子的能量通常表示为 $\hbar\omega$ ,其中 $\hbar$ 是普朗克常数除以 $2\pi$ , $\omega=2\pi f$ 是角频率。波长 $\lambda$ 通常以纳米( $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ )和埃( $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ )为单位。参见附录 A 中物理常数和转换因子。

\*\* 这个光谱区的标准参考数据请见参考文献 1~4。





观察更为微小的结构  
写更为微小的图样  
对元素和化学结构敏感

图 1.1 从红外(IR)到 X 射线区的电磁光谱。可见光用红(650nm)、绿(530nm)、蓝(470nm)波长表示。较短波长的是紫外(UV)辐射、极紫外(EUV)辐射、软 X(SXR)射线和硬 X 射线。作为参考,图中还显示了硅在 99.2eV(12.5nm 波长)的 L 吸收边,碳在 284eV(4.37nm)的 K 吸收边,氧在 543eV(2.28nm)的 K 吸收边,硅在 1.84keV(0.674nm)的 K 吸收边,铜在 8.98keV(0.138nm)的 K 吸收边,铜在 0.154nm 或 1.54Å(8.05keV)的  $K_{\alpha}$  发射线,以及二倍的玻尔半径  $2a_0 = 1.06\text{Å}$ ,它是玻尔氢原子模型中  $n = 1$  的轨道直径,但是它更一般的是指一个尺度,即所有原子中的大部分电荷将包括在该尺度内。垂直虚线表示用于隔离真空的通常窗口材料的透射极限。图中显示了通常厚度的熔石英(纯  $\text{SiO}_2$ )在 200nm、约 100nm 厚的硅氮薄膜( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )在 15nm,和  $8\mu\text{m}$  厚的铍箔在约 1nm 的短波透射极限。

别对应从原子最紧束缚的态(主量子数分别为  $n = 1$  和  $n = 2$  的轨道),通过光吸收电离一个原子实电子所需要的光子能量,这将在这一章的后面进行描述。图 1.1 显示了碳( $C_K$ )、氧、硅和铜的 K 吸收边,还显示了刚好在 100eV 以下的硅的 L 吸收边( $Si_L$ )。

在表 1.1 中,我们可以看到许多吸收边都处于软 X 射线和极紫外光谱区。这个光谱区域与邻近的光谱区域的区别是,在这个光谱区域中,所有的材料都有很强的吸收。在较低的光子能量下(即在可见光和紫外光谱区)和在较高的光子能量下(即在硬 X 射线区),很多材料变得透明,一般不需要利用真空隔离技术。例如,图 1.1 显示的垂直虚线表示通常的窗材料的透射极限,用这些材料可做成面积达数平方厘米的真空窗口,既可以用于保持真空,又允许图示光谱区域的辐射透过。在 UV 区,毫米厚度的熔石英,一种纯  $\text{SiO}_2$  的形式,可以透射的波长短至 200nm。当波长更短时,就进入了真空紫外区域(VUV)。对这个区域的辐射,空气和所有材料都是吸收的。图中所示的正巧短于 1nm 波长的虚线是薄的铍箔(约为  $8\mu\text{m}$ )的透射极限,它可透过能量大于约 1.5keV 的光子。很多年以来,这两种材料被定义为是可得到的窗口材料的极限。近年来,像硅氮化物(理想配比的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )这样的一些薄膜( $\approx 100\text{nm}$ ),已经使透射窗扩展到了恰好在 100eV 以下的光子能量,如图 1.1 所示。