

(美) R. C. 埃尔顿 著

# 射线激光

*X-ray laser*

科学城·1992

## 译 者 序

近年来，X射线激光研究无论在理论方面，还是在实验方面，都取得了较大进展，其中，实验方面的进展尤为突出。然而，迄今为止，国内还没有一本既全面介绍X射线激光的基础知识，又含有该领域研究人员感兴趣的技术细节的专门参考书。为了满足广大读者的需要，我们特意抽时间翻译了这本书。它既是初学者的入门读物，也是该领域科技工作者的一本方便参考资料。

该书是在杨建国、江文勉和温树槐组织领导下翻译的。

第一章由张兰芝翻译，杨建国校对；第二章由张兰芝翻译，江文勉校对；第三章由杜凤英翻译，尤永禄校对；第四章由蔡玉琴翻译，尤永禄校对；第五章由张启仁翻译，张兰芝校对；第六章由尤永禄翻译，张启仁校对；第七章由江文勉翻译，张兰芝校对。杨建国与谢平做了通校工作。

本书的出版得到了杨建国、陈涵德、赵永宽、陶祖聪、彭翰生、周传明等同志的大力支持。《强激光与粒子束》编辑部对本书的译稿提了一些宝贵的修改意见，对本书的出版给予了积极支持。在此，译者深表感谢。

由于译者水平有限，翻译中的不妥之处在所难免，敬请读者指正。

译 者

一九九二年七月

## 前 言

自激光器发明以来,在向 X 射线波段扩展激光器的研制领域方面,已经取得了长足的进展。近 5 年来,在实验方面,成绩尤为显著。然而,迄今为止却还没有一本既全面介绍 X 射线激光器基础知识,又包含有该领域研究人员感兴趣的技术细节的专门参考书。撰写本书是想填补这项空白。本书是初学者的入门读物,也是该领域专家的一本方便参考资料。作者无意去评述 X 射线激光领域以前和现在正在进行的全部研究活动。对这类综述文献感兴趣的读者,请参阅 1976 年的综述文章[R. W. Waynant and R. C. Elton, Proc. IEEE, 64, 1059 (1976)] 和 1984 年的引文汇编[P. L. Hagelstein, in "Atomic Physics 9" R. S. Van Dyck, Jr., and E. N. Fortson, eds., p. 382 (World Scientific Publ. Co., Ltd., Singapore, 1984)]。至于涉及该领域某些特殊问题的评述则穿插在本书的相应章节。

本书着重介绍用高温等离子体作为介质产生的 X 射线激光。这是目前 X 射线激光研究中最成功的领域。对其它可能的介质目前研究较少。其中,有些工作尚有成效,有些则还处在设想阶段。第六章讨论了这些设想方案。

本书对不同谱区采用了不同的波长单位。对于  $\lambda > 1.24\text{nm}$  的 X 射线谱区,  $\text{\AA}$  ( $0.1\text{nm}$ ) 是该区传统使用的波长单位(本译文一律改用  $\text{nm}$  作单位),已广泛用于 X 射线激光文献中,因其大小适宜,用来十分方便。对  $\lambda < 1.24\text{nm}$ , 即光子能量  $h\nu > 1\text{keV}$  谱区,波长以光子能量  $h\nu$  为单位。 $\text{nm}$  与  $\text{eV}$  的近似换算关系为  $\lambda[\text{nm}] = 1240/h\nu[\text{eV}]$ 。为描述驱动激光器,在红外谱区内,用  $\mu\text{m}$  作为波长单位。对波长更长的谱区,则采用 cgs 单位制(译文一律换算为国际单位制单位)。

第一章评述了一些基础知识和对 X 射线激光研究至关重要的一些实践经验;第二章介绍了 X 射线激光器设计、运行和诊断的基本原理;第三至五章着重于讲述等离子体 X 射线激光器的一些颇具

特色的泵浦方法。每分析一种具有发展前途的泵浦机制之后，伴之相关实验的描述。第六章介绍正在研究的可供选择的(不用等离子体)研制 X 射线激光器的几种途径。在第七章概述了 X 射线激光技术资料，并把 X 射线激光器与其它高亮度源作了比较。在本章的结尾，对其许多潜在应用也作了介绍。书后附有本书所用符号及其定义、最先出现的页码一览表。

作者感谢海军实验室，利弗莫尔实验室，国家标准与技术研究所和马里兰大学及其它单位惠予合作的同事们，对他们为本书所做的贡献，深表感激。作者衷心感谢 H. R. Griem 教授，他不但在 X 射线激光研究方面不断给予鼓励与合作，而且在等离子体谱学方面使作者受到了良好的训练。作者特别感谢作者的夫人和全家在他本人撰写书稿过程中给予的宽容、鼓励和理解，使本书得以早日问世。

# 目 次

## 第一章 引 言

<b>1.1 X 射线波段激光器</b> .....	1
1.1.1 背景 .....	1
1.1.2 数据库 .....	1
1.1.3 发射激光介质 .....	2
1.1.4 结构 .....	2
1.1.5 发展阶段 .....	3
<b>1.2 感兴趣波段的定义和独具的光学特性</b> .....	4
1.2.1 波长范围的界定 .....	4
1.2.2 窗与滤片 .....	5
1.2.3 反射镜 .....	8
参考文献 .....	12

## 第二章 短波长激光器原理

<b>2.1 运行模式</b> .....	14
2.1.1 迪克超辐射 .....	14
2.1.2 超荧光 .....	15
2.1.3 放大自发发射(ASE) .....	15
<b>2.2 增益公式与适用条件</b> .....	16
2.2.1 持续时间与定义 .....	16
2.2.2 ASE 系统增益 .....	17
2.2.3 多损耗谐振腔的增益 .....	28
2.2.4 等离子体效应 .....	31
2.2.5 所需泵浦功率 .....	49
<b>2.3 等离子体中X 射线增益分析技术</b> .....	51
2.3.1 简单稳态分析模型 .....	52

2.3.2	速率方程数值分析	55
<b>2.4</b>	<b>泵浦模式和装置</b>	<b>59</b>
2.4.1	泵浦脉冲宽度的必要条件	59
2.4.2	泵浦装置	59
<b>2.5</b>	<b>增益测量方法学</b>	<b>65</b>
2.5.1	粒子数反转和低增益	66
2.5.2	激光介质长度变量	68
2.5.3	正交强度测量	69
2.5.4	负吸收测量	70
2.5.5	有反射镜的多通过程	70
<b>2.6</b>	<b>测量仪器</b>	<b>73</b>
2.6.1	真空紫外(VUV)成像装置	73
2.6.2	XUV 光栅谱仪	78
2.6.3	晶体谱仪	81
2.6.4	X 射线与 XUV 探测	82
2.6.5	时间分辨	83
2.6.6	X 射线强度标定	87
	参考文献	90

### 第三章 激发等离子体实现泵浦

<b>3.1</b>	<b>电子碰撞激发泵浦的分析</b>	<b>96</b>
3.1.1	一般关系式	97
3.1.2	亚稳态能级的单极激发	99
<b>3.2</b>	<b>电子碰撞激发泵浦的激光实验</b>	<b>106</b>
3.2.1	VUV 分子激光器	106
3.2.2	毛细管放电型VUV 离子激光器	108
3.2.3	等离子体离子XUV 激光器	108
<b>3.3</b>	<b>光激发泵浦的分析</b>	<b>122</b>
3.3.1	对类H 离子的分析	123
3.3.2	影响增益的某些实验条件(和限制)	127
<b>3.4</b>	<b>光激发泵浦实验</b>	<b>136</b>

3.4.1 VUV 实验 .....	136
3.4.2 Doppler 频移的变化 .....	138
参考文献 .....	138

#### 第四章 电子俘获形成离子激发态的泵浦机制

4.1 电子碰撞复合泵浦的分析 .....	143
4.1.1 能级结构 .....	143
4.1.2 类H 离子的分析 .....	144
4.1.3 向非类H 离子的扩展 .....	150
4.2 复合实验: 碰撞电离等离子体 .....	150
4.2.1 实验条件 .....	150
4.2.2 短脉冲加热形成的激光等离子体的膨胀和冷却 .....	152
4.2.3 约束在螺线管中的激光等离子体 .....	154
4.3 把复合分析方法扩展用于光电离等离子体 .....	157
4.3.1 两步泵浦顺序 .....	157
4.3.2 类He 等离子体的光电离 .....	158
4.3.3 类Ne 等离子体的光电离 .....	160
4.4 复合实验: 光电离等离子体 .....	161
4.4.1 用光电离/ 复合泵浦类 Ne 离子 .....	162
4.4.2 利用C <sup>4+</sup> 辐射产生 Na <sup>8+</sup> 的光电离/ 复合 .....	163
4.5 双电子复合泵浦的分析 .....	164
4.5.1 过程 .....	164
4.5.2 分析 .....	165
4.6 电荷转移泵浦的分析 .....	168
4.6.1 原子- 离子电荷转移 .....	168
4.6.2 分析 .....	170
4.6.3 离子- 离子电荷转移 .....	172
4.7 电荷转移泵浦实验 .....	172
4.7.1 等离子体/ 势垒相互作用实验 .....	173
4.7.2 与C 靶碰撞的高能 Ar <sup>+</sup> 束流 .....	173

参考文献 .....	174
------------	-----

## 第五章 X 射线激光

5.1 电子碰撞电离泵浦研究 .....	177
5.1.1 过程 .....	177
5.1.2 例子: 类Na 原子离子的电离 .....	178
5.2 离子间的碰撞泵浦分析 .....	179
5.3 光电离泵浦分析 .....	180
5.3.1 有关的过程 .....	180
5.3.2 Na 和类 Na 离子中的激光作用 .....	181
5.3.3 其它的光电离方案 .....	185
5.4 直接光电离泵浦实验 .....	187
5.4.1 中性Na 的光电离 .....	187
5.4.2 中性Ne 的光电离 .....	187
5.5 Auger 衰变泵浦的分析 .....	187
5.5.1 低能级空穴的产生 .....	187
5.5.2 上、下能级的占据数和反转的产生 .....	189
5.5.3 通过上能级的Auger 移动实现连续工作 .....	189
5.6 Auger 衰变泵浦的实验 .....	189
5.6.1 在VUV 腔中的 Auger 衰变泵浦原子的激光发射 .....	189
5.6.2 Cu $K_{\alpha}$ 实验中呈现的 Auger 效应 .....	189
参考文献 .....	190

## 第六章 产生 X 射线激光的其它途径

6.1 谐波发生和频率混合 .....	192
6.1.1 引言 .....	192
6.1.2 非线性极化 .....	194
6.1.3 具体工作模式 .....	194
6.1.4 X 射线参量变换过程 .....	200
6.1.5 概要 .....	200
6.2 自由电子激光器(FELs) .....	201



6.2.1	基本工作原理	201
6.2.2	现状	204
6.2.3	概要	207
6.3	$\gamma$ 射线激光器(Grasers)	207
6.3.1	引言	207
6.3.2	Grasers 的增益分析	208
6.3.3	工作模式	212
6.3.4	概要	218
6.4	其它途径	218
6.4.1	晶体中的X 射线激光过程	218
6.4.2	自由电子的受激跃迁	221
6.4.3	受激Compton 散射	222
6.4.4	相对论离子的光泵浦	223
	参考文献	223

## 第七章 要点概述、应用与预测

7.1	激光等离子体泵浦要点概述	228
7.1.1	有成功希望的泵浦模式概述	228
7.1.2	效率	230
7.1.3	新机制的一些设计判据	231
7.2	规划的X 射线激光特征	232
7.2.1	结构	232
7.2.2	波长	233
7.2.3	增益介质	233
7.2.4	尺度	233
7.2.5	准直与束发射度	234
7.2.6	输出功率	234
7.2.7	脉冲长度	234
7.2.8	线宽	235
7.2.9	相干性	235

<b>7.3 与其它XUV 源的比较</b> .....	<b>237</b>
7.3.1 电子碰撞源 .....	237
7.3.2 同步辐射源 .....	239
7.3.3 高密度等离子体X 射线源 .....	241
<b>7.4 应用</b> .....	<b>243</b>
7.4.1 引言 .....	243
7.4.2 科学应用 .....	245
7.4.3 技术方面 .....	249
7.4.4 生物学 .....	253
7.4.5 医学放射学 .....	257
7.4.6 总结 .....	258
<b>7.5 前景预测</b> .....	<b>259</b>
参考文献 .....	260
<b>符号一览表</b> .....	<b>263</b>

# 第一章 引言

## 1.1 X 射线波段激光器

### 1.1.1 背景

最初几篇激光论文在 60 年代早期问世的时候，就已经预言了激光最终要向 X 射线波段扩展。这些作者认识到面临这种扩展的挑战会是十分棘手的。这主要是因为他们觉察到了：(a)增益与波长的定标关系通常是不适宜的，(b)谐振腔反射镜效率很低，(c)所需泵浦功率高。此外，早期还担心在传统的  $K\alpha$  跃迁衰变速率表征的飞秒( $10^{-15}$  s)时间尺度，激光必然会自终止。当时，这么短的脉冲间隔，实际上似乎是不可能达到的。

然而，后来认识到利用高度电离原子的外壳层“光学”跃迁是可以达到准连续波(CW)运行条件的，而这种运行条件只受泵浦脉冲时间间隔限制。在这一运行模式中，粒子数反转是靠下能级密度的快速倒空来维持的，而倒空又通常是由向基态的辐射衰变来完成的。这种概念是利用低电离态原子对可见光激光和近紫外激光成功的进行外推而发展起来的。这是过去 20 多年来发展最快的领域。现在我们仍然希望在低电离态，甚至可能在中性原子中，最终进展到内壳层跃迁以导致更短波长的激光产生。

### 1.1.2 数据库

幸而，从很早的天体物理学和等离子体的研究中业已积累了多电荷离子的原子结构和辐射特性的大量数据。自 30 年代用真空火花源时起，实验室诸多模拟实验扩充了这种数据。而磁约束可控热核聚变的实验研究，尤其对杂质特性和诊断学的研究均对数据库和专业数据库贡献极大。然而，70 年代初开始的惯性约束聚变计划的发

展，才为成功的 X 射线激光实验提供了必备的理论、数据以及最终必需的高的体功率密度。

把与中性原子行为极为相似的高剥离离子视为属于特殊的等电子序列，并且具有某些共同的特性。其中最简单的推广是类 H 原子序列，剥离到只剩一个电子。外推公式非常简单与精确。因此，类 H 序列已成为 X 射线激光设计中一个最受重视的序列，被广泛用于本书的实例中。包含两个、三个或更多个剩余束缚电子的其它序列称为类 He(He-like)，类 Li(Li-like) 等。

通常用已经剥掉的电子数表示特殊的离子。例如，对核电荷  $Z=6$  的类 H 碳离子，则是  $C^{5+}$ 。全书均采用这一习惯写法。而光谱则往往用罗马数字表示，对中性原子从 I 开头。这个习惯写法在天体物理学文献中尤为明显。因此，类 H 碳谱是以 C VI 表示的。而对于多电荷重原子，则显得颇不方便。所以，在需要使用这种符号的地方，我们会注明两者之间关系，避免混淆。

### 1.1.3 发射激光介质

我们把离子与其局部区域被剥离的(自由)电子所构成的体系叫做等离子体(总体上是电中性的)。有时称它为物质的第四态。等离子体不只是由它的大小与形状确定的，而且主要还是由其电子和离子的温度与密度确定的。这些参数通常分别用  $T_e$ 、 $T_i$ 、 $N_e$  和  $N_i$  表示。而往往不总是  $T_e = T_i$ 。对于纯的单一类型等离子体， $N_e$  和  $N_i$  是通过离子电荷关联的。例如，核电荷为  $Z$  的类 H 离子， $N_e = (Z - 1)N_i$ 。在第三至第五章的分析中将普遍采用这个关系式。

### 1.1.4 结构

绝大多数激光器均工作在可见光与红外光谱段，沿法布里-泊罗式反射谐振腔确定的轴向运行。把激光工作介质泵浦到粒子数密度反转状态。沿其轴向的放大是由受激发射提供的。而且，放大强度则随通过介质的厚度而指数增长。借助于有效谐振腔达到高度准直与相干性。

在 X 射线波段，现有谐振腔反射镜的反射率比较低。因此，到目前为止，X 射线激光器主要还是基于通过介质时非相干的自发发射放大(又称 ASE)。这种放大发生在沿特定方向的单一路程(光程)

内(ASE 更完整的定义将在第二章 2.2.2 节介绍)。所以, 需要介质的增益系数比具有有效谐振腔的普通激光器约大 100 倍。适当制备的介质原则上在任何方向均可进行激光发射, 这一点很能引起思考的兴趣。这就是某些天体可能以 ASE 进行辐射假设的基础。

然而, 若期望充分放大, 就得选定一个最佳方向。例如, 在球形等离子体中, 用一个低功率振荡器产生的外加驱动的束就可以做到。有时称之为 MOPA (Master - Oscillator, Power - Amplifier) 原理。而其它的约束条件往往要求激光介质几何形状为棒形。这不仅包括与下能级倒空跃迁不透明度有关的再吸收, 而且还包括可得到的驱动功率。这些约束条件将在第二章详细讨论。

### 1.1.5 发展阶段

X 射线激光器从概念到应用的逻辑发展过程见图 1.1 的流程图。数字模拟与实验工作几乎是齐头并进的。通过全书将会看清这几个阶段。

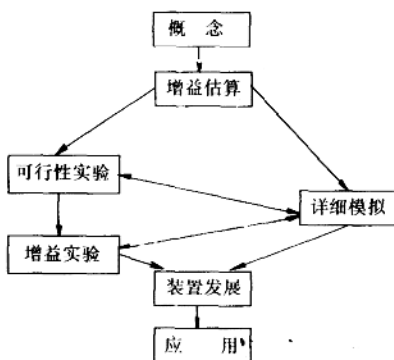


图 1.1 X 射线激光器研究与发展的逻辑方块图

我们可以举些相当普通的例子说明一下流程图各过程的含义。图的上半部分是 70 年代时普遍概念化的典型例子。在 80 年代, 由于可得到适当的等离子体介质, 在增益实验与器件方面均已取得了明显进展。用长波长激光器产生谐波辐射业已达到可行性实验阶段, 甚至能产生有用的短波长相干发射。另外, 自由电子 X 射线激光器

和核  $\gamma$  射线激光器目前均处于构想阶段。此外，其它一些方案，如固态晶体 X 射线激光，受激电子俘获和康普顿散射，目前也正在构想中。

## 1.2 感兴趣波段的定义和独具的光学特性

在讲述本书主要部分之前，有必要先来了解一下短波长谱段的一些定义与独具的特性。这些定义对于讨论 X 射线激光是不可缺少的。先定义主要使用的波长段，然后讨论其短波长谱段物质独具的一些光学性质。这些概念对于理解与该种谱类激光器有关的附加复杂性均是十分重要的。测谱的仪器，如光栅与探测器放在第二章的 6.6 节讨论。

### 1.2.1 波长范围的界定

从 Samson 提出的一些早期建议出发<sup>[1]</sup>，我们可以把短于 200nm 的紫外波长分成稍有重叠的几种细类。但都是 X 射线激光、等离子体物理和天体物理领域传统上所接受的，波长的范围并不很严格。这种情况可由图 1.2 说明。

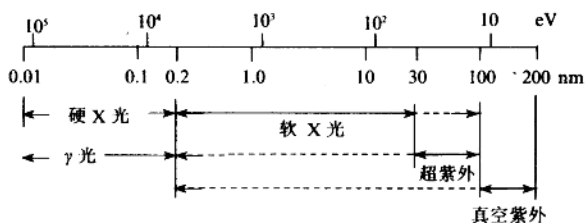


图 1.2 对 X 射线激光有用波长与光子能量范围的标识图

#### 1.2.1.1 真空紫外(VUV)波段

扩展到 0.2nm 的宽波段，在实用的光程长度上大气对这一波段是不透明的，人们一直称之为真空紫外，或真空-UV 甚至 VUV 谱段。只有在真空中才能进行有效距离传播，或者说对于其较长波长端只能在稀薄气体中传播。如果进一步标识小于 100nm (见下图) 的波段的话，那么真空-UV 则具体地表示 100 ~ 200nm 的波段；它也是传统光学适用的波段。这就说明了在图 1.2 中，真空紫外用了一段实线和一段虚线表示的原因。

### 1.2.1.2 超紫外(XUV或EUV)波段

在波长小于100nm,尤其是30~100nm的真空波段,被命名为超紫外,或XUV(或EUV)。XUV与EUV相比,人们似乎更愿意采用XUV,这也许是因为它邻近软X射线波段的缘故吧!

### 1.2.1.3 X射线波段

总的X射线波段一般包括70~0.01nm的波长范围<sup>[23]</sup>。然而,传统上则认为是从超紫外波段端点约30nm处开始的。这一X射线波段再细分为“软”和“硬”两个部分。软的为0.2~30nm波段;硬的是比它更短的波段。软波段的X射线通常用nm为单位的波长来描述。由于X射线激光器目前均工作在这个波段,所以本书基本上采用了nm波长单位。波长通过 $\lambda=c/\nu$ 可转换为频率, $c$ 是真空中光速。对于硬X射线,传统上采用keV单位光子能量作为标示,它也是颇为实用的。对于以nm为单位的波长,其换算式是

$$h\nu = \frac{1.24}{\lambda} \text{ keV} \quad (1.1)$$

因此, $\lambda=0.01\sim 0.2\text{nm}$ 硬X射线波段应等同于 $h\nu=124\sim 6.2\text{keV}$ 。这由图1.2的上部标尺所示。

### 1.2.1.4 硬X射线与 $\gamma$ 射线波段

从放射性核素发射的能量 $h\nu$ 在10keV~250MeV宽范围的光子称为 $\gamma$ 射线<sup>[31]</sup>。这个定义在低能区与硬X射线波段重叠。两者的差别在于前者是核跃迁,而后者则是原子跃迁,对本书涉及的内容尤为如此。因此,第六章要介绍的,通常构想的10~100keV核 $\gamma$ 射线激光也就十分自然地划在X射线激光类了。

## 1.2.2 窗与滤片

在上述定义的真空紫外波段,当辐射源在这样的气压下工作时,即现有的真空泵不能使探测系统中的压力减小到能够使辐射传输到探测器时,窗是必不可少的。这与特定气体和波长有关系<sup>[11]</sup>。例如,惰性气体氦,对光电离限为53.9nm这么短的波长,在适当高的气压下具有良好的透射性。正因为如此,通常把大气压下一定光程长度的氦作为一种净化模式(如果光程 $\geq 1\text{m}$ ,在高压下

可能发生分子氮的吸收)。另外,双原子气体,如氮和氧(空气)对小于200nm的波长是高度不透明的,一定得把它们去掉。因而,加窗又可把探测系统与源隔开。气体也可象滤片一样把不要的、小于透射截止波长的辐射滤掉。例如,氩气在气压约133.3Pa下使波长约小于80nm的光衰减。其它不大引人注意的替代窗的方案是下面2.23节所述的开口式针孔或窄狭缝。

### 1.2.2.1 晶体

许多电介质材料在真空紫外谱段仍然是透明的。它们可以用作窗,透镜和1/4与1/2波片材料(如果材料是双折射的话)。透射率在截止波长附近(约5nm)仍然很高。各种材料的透射率与波长的关系曲线如图1.3所示<sup>[4]</sup>。作为一些通俗例子,高质量石英材料可适用于165nm那么短的波长。曾有报导表明人造晶体对150nm波长的光的透射率为80%<sup>[5]</sup>。氟化锂晶体透射波长可短至110nm(然而,假如因等离子体碰撞而形成色心,那么吸收增加和截止波长实际上向长波长方向移动)。因此,在用这么短的透射截止波长去掉多谱线数据分析中的高阶谱干涉的时候,总的来说还是不坏的。

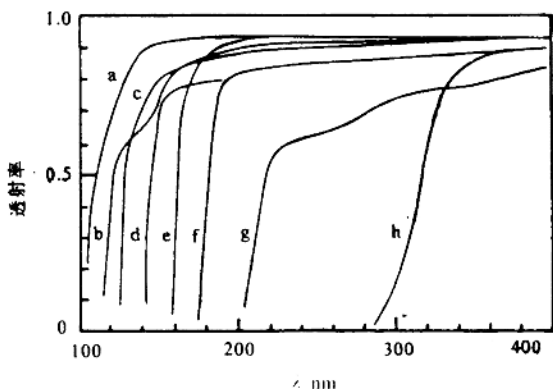


图 1.3 各种紫外光学材料的透射率

(a) LiF, 2mm; (b) MgF<sub>2</sub>; (c) CaF<sub>2</sub>, 1mm; (d) 兰宝石, 1mm; (e) 石英, 1mm;  
(f) 磷酸二氢铵(ADP), 2.5mm; (g) 方解石, 11mm; (h) 显微镜玻璃片, 1.3mm

(以上取自参考文献[4])



此外，还可以用这些窗作支撑透射波段多层带通滤片的底衬。事实上用铝、氟化锂和氟化镁作为这种底衬已获得了成功。其峰值透射率达 15~30%，半宽度为 15~40nm。

### 1.2.2.2 薄金属

在更短的一些超紫外波长，有些称为自由电子金属材料，它们的行为类似于稠密等离子体，适合作无支撑薄膜式的宽带滤片。透射带从短波长吸收限截止扩展到反射居优势的长波长等离子体截止。其中，光子穿透深度是很大的。如果样品很薄(约 100nm)，透射率可能高达 70%。各种材料及其厚度的透射率均绘于图 1.4<sup>[6]</sup>。这些膜是非常娇弱的。但是，已把它们成功地用在气压差为一个大气压的精细丝网作背衬的窄狭缝开口或针孔开口上，当然不如使用厚窗那么方便，尤其是在大孔径上应用。

一个极为普通的例子是铝，它的透射波长在 17~70nm 之间。

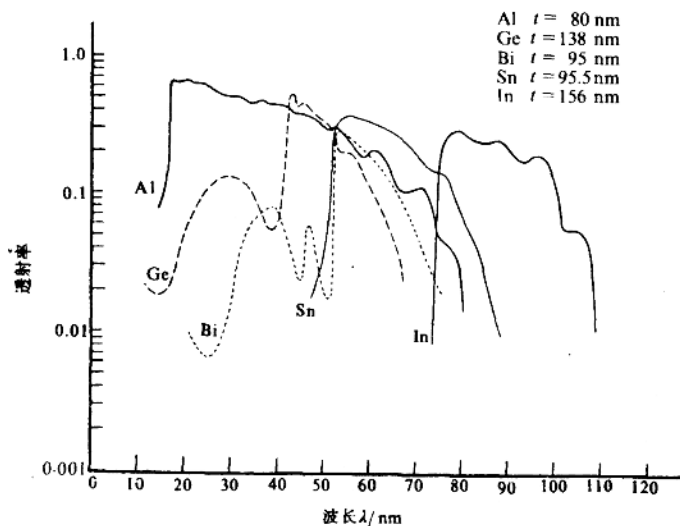


图 1.4 具有标示厚度( $t$ )的几种薄金属膜的透射率(取自参考文献[6])