

# 极端远紫外光刻的等离子体光源及其光学性质研究进展\*

曾交龙<sup>†</sup> 高城 袁建民

(国防科学技术大学理学院物理系 长沙 410073)

**摘要** 现代技术的飞速发展需要集成电路不断小型化,因而开发下一代光刻光源以满足小型化的要求成为当前的一项紧迫任务。目前工业界确定的下一代光刻光源是波长为 13.5nm 的极端远紫外(EUV)光源,它能够把光刻技术扩展到 32nm 以下的特征尺寸,氙和锑材料的等离子体光源被认为是这种光源的最佳候选者。文章在介绍 EUV 光刻原理和 EUV 光源基本概念的基础上,讨论了目前研究得最多、技术最成熟的激光产生的和气体放电产生的等离子体 EUV 光源,对 EUV 光源的初步应用进行了简单介绍,并着重对氙和锑材料产生的等离子体发射性质和吸收性质的实验与理论研究进展进行了详细介绍与讨论。目前的理论研究进展表明,统计物理模型还不能很好地预测氙和锑等离子体的发射与吸收光谱,因此迫切需要发展细致能级物理模型,以得到更为精确的等离子体光学性质参数,并用于指导实验设计,提高 EUV 转换效率。

**关键词** 极端远紫外光刻(EUVL) EUV 光源 激光、气体放电产生的等离子体 EUV 光源 EUV 光源的发射与吸收性质

## Plasma light sources for extreme UV lithography and their optical properties

ZENG Jiao-Long<sup>†</sup> GAO Cheng YUAN Jian-Min

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Considerable effort has been devoted over the last decade to the development of extreme ultraviolet (EUV) light sources for nanolithography. The 13.5 nm wavelength was imposed by industrial standards due to the availability of high-reflectivity Mo/Si multilayer mirrors so that a resolution of 32 nm can be attained. Xenon and tin are considered to be the best candidates for EUV light sources. In this review we first briefly introduce the concepts and principle of EUV lithography, and then discuss recent progress in both experimental and theoretical research on laser produced and gas discharge produced plasma light sources, with emphasis on the emission and absorption properties of xenon and tin plasmas. Theoretical studies show that statistical physical models are not yet able to predict the exact absorption and emission spectra of EUV plasmas. It is imperative that a detailed energy level model be developed to obtain accurate optical parameters to guide experimental design and to improve EUV conversion efficiency.

**Keywords** extreme ultraviolet (EUV) lithography, extreme ultraviolet light source, laser-produced and gas discharge produced EUV source, emission and absorption properties

## 1 引言

光刻技术在从等倍光刻发展到投影微缩光刻过程中,使用波长越来越短,从可见光 436 nm 到紫外

365 nm,然后又发展到深紫外 193 nm,而且集成度

\* 国家自然科学基金(批准号:10474138)资助项目,国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

2007-04-10 收到初稿 2007-04-24 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: jiaolongzeng@hotmail.com

越来越高。目前半导体制造中用于光刻的光源为使用 ArF 准分子激光器产生的深紫外 193 nm 光源。紫外光刻技术已经接近了光学光刻技术的极限。为了制造集成度更高的电路,人们在积极寻找下一代光刻(next generation lithography, NGL)光源,近年来发展的下一代光刻技术有:软 X 射线投影曝光技术、电子束直写技术、电子束投影曝光技术、高能等离子体光源或同步辐射光源、聚焦离子束成像技术和离子束投影曝光技术等<sup>[1,2]</sup>。下面只讨论与第一种光刻技术有关的物理问题。

早在 80 年代中期,Gohil 等人<sup>[3]</sup>就提出了使用激光产生的等离子体软 X 射线辐射用作光刻的概念,其基本思想为:用高反射率的软 X 射线反射镜面构建一个工作波长为 13 nm 的全反射投影光刻系统。当时这项技术被命名为软 X 射线投影光刻,并预计会在特征尺寸进入 0.1 μm 时得到应用。后来软 X 射线投影光刻改名为极端远紫外光刻(EUVL)。1996 年,美国、日本、德国等几个国家开始实施 EUV 投影光刻技术联合攻关项目。此外,国际上开展 EUV 光刻研究的单位还有:俄罗斯列别捷夫物理研究所、德国 Lehrstuhl für Lasertechnik 和 RWTH Aachen 研究所,以及法国和新加坡等多家研究单位和公司。

经过多年的发展,在众多方案中,EUV 光刻技术被证明是最有发展前途的下一代光刻技术。在半导体工业中,利用它能够生产体积更小、速度更快的芯片,特征尺寸可以达到 32 nm 甚至更小。目前国际上选定的光源波长为 13.5 nm。本文在介绍 EUV 光刻原理和 EUV 光源基本概念的基础上,主要讨论与激光和气体放电产生的等离子体 EUV 光源有关的基本物理问题,并着重对 EUV 等离子体的发射性质和吸收性质的实验与理论研究进展进行详细介绍与讨论。

## 2 EUVL 原理

EUV 光刻原理如图 1 所示。利用激光能或电能轰击靶材料产生等离子体,等离子体发出 EUV 辐射,EUV 辐射经过由周期性多层薄膜反射镜组成的聚焦系统入射到反射掩模上,反射出的 EUV 光波再通过反射镜组成的投影系统,将反射掩模上的集成电路的几何图形投影成像到硅片上的光刻胶中,从而形成集成电路所需要的光刻图形。

对 EUVL 的光学系统,几乎所有物质,即使是中

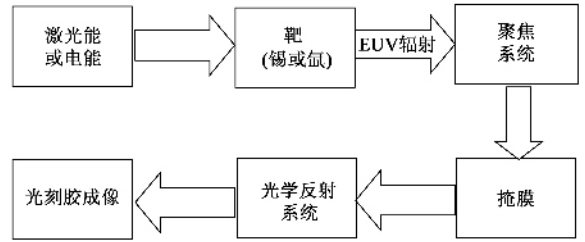


图 1 EUV 光刻原理示意图

低  $Z$  ( $Z$  为原子序数)材料如铝、铁等,在 EUV 波段都表现出强烈的吸收特性,因而 EUV 的成像必须在真空系统中。图 2 实线给出了我们<sup>[4]</sup>使用细致谱项模型得到的铝等离子体(温度 20 eV,质量密度 0.01 g/cm<sup>3</sup>)在 13.5 nm 附近的吸收系数,虚线为实验结果<sup>[5]</sup>。可以看出,铝材料在 13.5 nm 附近吸收强烈。高  $Z$  材料在 EUV 波段的吸收也很强,因此,为了获得 EUV 波段内大于 60% 的反射率,EUVL 成像系统的镜面要涂有多层膜涂层(单纯一种元素物质无法在 EUV 波段达到高反射率)。所谓的多层膜指的是高散射和低散射两种材料交替沉积而成的一种人造涂层,高低散射材料的间距为几纳米甚至更小,从而使 EUV 可以像可见光那样进行反射、聚焦和成像。在 13.5 nm 附近,Mo/Si 多层结构在光线垂直入射时的反射率达到 65.5%,因而常用来做成像系统的镜面。

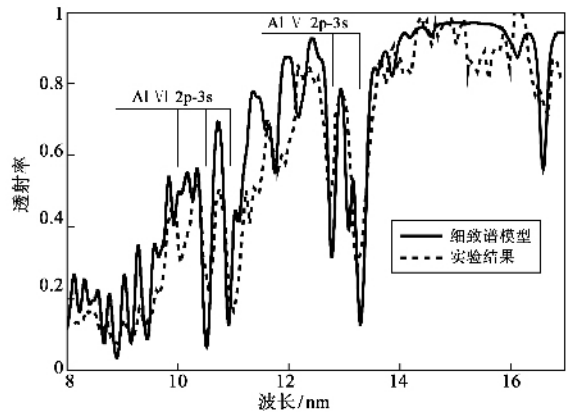


图 2 铝等离子体(20 eV, 0.01 g/cm<sup>3</sup>)的透射光谱

## 3 EUV 光源

获得干净、高效率、高功率的光源是 EUVL 成功的关键因素,对 EUV 光源的基本要求可参阅文献[6],主要有如下一些指标:工作波长、EUV 功率、热斑大小、可收集角度、重复频率、脉冲-脉冲可重复性、碎片对部件寿命的影响、非 EUV 辐射以及真空

质量等。EUV 光源要能够达到实用,在照明系统的入口处,在波长为 13.5 nm 带宽为 2% 的范围内,需要 115W 的 EUV 输出功率。满足大批量生产的 EUV 光源参数见表 1。

表 1 用于大批量光刻的 EUV 光源参数要求

光源参数	要求
中心波长	13.5 nm
IF 处 EUV 功率(2% 带宽)	115 W
重复频率	≥7000—10000 Hz
整体能量的稳定性	<0.3%
进入照明系统的最大立体角	0.03—0.2 sr
最大的面积 × 立体角	1.0—3.3 mm <sup>2</sup> · sr
照明光学系统寿命	30000 h

一段时间以来,对 EUV 光源的研究主要集中在同步辐射、激光产生的等离子体<sup>[7]</sup>和气体放电产生的等离子体<sup>[8]</sup>光源上。同步辐射是环形加速器中做循环运动的高速电子在经过弯转磁铁时沿电子轨道切线方向上所发出的高强度电磁辐射。使用同步辐射光源作为 EUVL 光源的优点是,技术非常成熟,运行稳定,功率相当高,小型化程度也很好,对光刻胶的灵敏度要求低,芯片生产效率高。其缺点是一旦储存环出了问题,芯片工厂的生产将陷于瘫痪<sup>[1]</sup>。因而 EUV 光源的产生主要依靠激光和气体放电产生的等离子体这两种方式。

使用的靶材有固体靶、循环低温气束和液滴靶等,可供选择的材料有锡、氙、氧、锂<sup>[9]</sup>等,最有潜力成为大批量生产用的材料应该是前两种。常温下氙是气体,锡是固体,因而锡作为 EUV 光源更容易污染光学器件,而使用包含 SnO<sub>2</sub> 纳米颗粒做成的液滴靶或以最少量的靶材维持 EUV 辐射输出可以有效地减少碎片污染。

德国、日本、法国、俄罗斯、美国等国家都已经建立了 EUV 光源实验装置。在这些装置中,既有使用氙材料的,也有使用锡材料的。到目前为止,还没有一家能够满足半导体工业中批量生产的要求。激光产生以及放电产生的等离子体光源究竟哪一种能最先成为大批量生产用的 EUV 光刻光源,目前还不能完全确定。

### 3.1 激光产生的等离子体 EUV 光源

激光产生的等离子体 EUV 光源是通过高功率的激光器轰击固体靶、液体靶或气体靶,在焦点处产生等离子体从而放出 EUV 辐射。采用的靶材多为氙气体靶、氙液体靶和锡靶,使用锡靶的转换效率比使用氙靶更高,故自 2002 年以来,实验室更多地使用锡靶进行实验。

激光等离子体 EUV 光源面临的主要问题一是需要建立高能量的激光器,二是寻找合适的介质靶以降低成本,减少碎屑的产生和提高转换效率。其中关键工作之一是要提高激光能量转换为所需要的 EUV(中心波长为 13.5 nm,带宽为 2%)输出能量的转换效率。目前,通过改善靶系统以及优化等离子体带内的 EUV 发射,锡等离子体能够达到的最高转换效率为 3%—4%,氙等离子体只能达到 2% 以下。

提高激光等离子体 EUV 光源转换效率的途径是要根据靶的性质确定适当的激光参数,包括激光器的波长以及激光脉冲的宽度、能量、功率密度、焦斑尺寸和重复频率等。使用不同的激光器系统产生的 EUV 光源特征也会有所不同。

当前激光产生的等离子体光源的发展面临着两大挑战:第一大挑战来自所需要的功率。为满足大批量生产的需要,按照目前最高的转换效率,激光系统的驱动功率需要 34000W(氙)或 9400—12000W(锡)。而在连续工作模式下,目前的商业固体激光器最大功率仅为 6kW。对脉冲激光系统而言,要建成这样的激光系统本身已非易事。第二大挑战是要保证等离子体收集器光学系统的长寿命。

### 3.2 气体放电产生的等离子体 EUV 光源

激光产生的等离子体 EUV 光源技术已比较成熟,但是由于它是将电能转换为光能,再转化为等离子体能量的三级转化过程,限制了能量转化效率的提高。而气体放电产生的等离子体 EUV 光源可将电能直接转换为等离子体辐射能,从而可以提高能量转换效率,而且气体放电装置较高能激光装置结构简单,价格低廉,因此气体放电等离子体 EUV 光源的研究日益受到重视。

依据放电方式的不同气体放电又分为 Z 箍缩、毛细管放电、等离子体聚焦和中空阴极放电等四种。四种放电方式各有优缺点,其中 Z 箍缩装置是目前为止研究得较为充分的气体放电方式,关于这四种放电方式的详细的介绍见文献[2]。

在大批量生产所需要的放电等离子体 EUV 光源中,要获得较高功率,主要依靠对放电区域的热控制。为了提高 EUV 功率,目前正在研究如何进一步控制热载及提高转换效率。对氙而言,提高转换效率是可能的,但使用发射效率更高的锡似乎更有优势。在输入电能相同时,使用锡的转换效率大约是使用氙材料的两倍,这一点很容易从图 3 看出来,该图示出了相同激发条件下两种材料的发射谱(见

Stamm U. J. Phys. D, 2004, 37 : 3244 )。

面对大批量生产的要求,放电等离子体 EUV 光源面临三个主要挑战:第一个挑战来自所需要的大功率。目前的实验表明,电能的转换效率为 2%—3%,这就意味着为了驱动放电,需要 24—70 kW 的电能,这需要更先进的冷却技术。第二个挑战与强电流有关。放电区域的高温以及等离子体对材料的刻蚀,限制了放电单元的寿命。电极表面的温度如果达到熔点,就有额外的液态物质形成与发射。第三个挑战是收集器光学系统的寿命。等离子体中各种高能离子、电子、中性原子等屑片以及电极系统的连续工作对收集器光学系统的表面寿命都有影响。

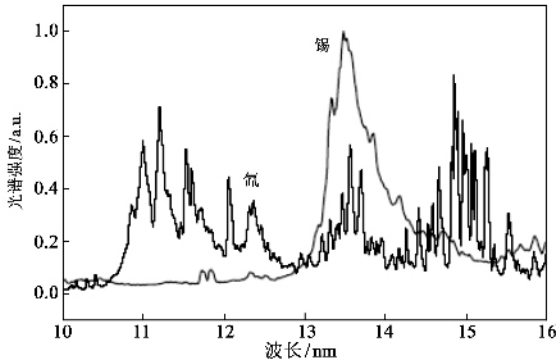


图3 相同激发状态下,放电等离子体 Xe 和 Sn 的发射谱

### 3.3 EUV 光源的初步应用

最近,Cheng 等人<sup>[10]</sup>报道了使用 EUV 光源进行亲笔文书光刻技术的初步结果。计算机产生的亲笔文书制造在 100 nm 厚的硅基上,使用 13.5 nm 的 EUV 辐射重构了文书的图像。计算机产生的亲笔文书可做成透射或反射式的,形成的像的分辨率主要由成像像素所限制,而曝光区域的大小由光源的空间相干性决定。

## 4 EUV 光源的光学性质

在 EUV 等离子体光源的研究中,等离子体的发射与吸收性质是最基本的物理量,在很多研究领域,如等离子体的辐射运输研究中都有重要应用。

对均匀等离子体发射谱和吸收谱的研究,根据对束缚-束缚辐射跃迁的不同处理方法,有多种不同近似程度的理论模型:平均原子模型(AA)、超级跃迁系模型(STA)、不可分辨跃迁系模型(UTA)、细致谱项模型(DTA)、细致能级模型(DLA)等。其中,AA,STA 和 UTA 在处理谱线发射与吸收过程中采用了统计方法,都称之为统计模型;DTA 和 DLA

在谱线处理中没有采用统计方法。

目前,国际上的理论工作主要在前三种模型中展开。对较高原子序数的物质材料,采用后两种精确理论方法的研究还不多。我们发展了细致谱项模型和细致能级模型,并且已经应用于中高 Z 等离子体吸收性质(如铁、溴、金等<sup>[11]</sup>)的研究。目前,正在将发展的细致能级物理模型应用于 EUV 光源及光学特性的研究。

### 4.1 等离子体 EUV 光源的发射性质

#### 4.1.1 实验研究

总的来说,虽然实验上测量了大量不同等离子体条件下氙和锡等离子体的发射谱,但是得到的氙和锡材料各价离子的详细光谱信息却非常有限。这是因为:一是复杂的原子结构导致谱线非常密集,在一定能量范围内形成一片不可分辨的整体;二是难以确定等离子体的状态,因而要得到有用的光谱信息比较困难。

Bowering 等人<sup>[12]</sup>使用等离子体聚焦箍缩装置,实验测量了 7—12 价的氙离子产生的等离子体发射谱,波长区域为 8—21 nm,分辨本领为 0.02 nm,实验结果见图 4。同时,为了分析实验结果,使用 Hartree-Fock 方法进行了理论模拟。理论与实验结果表明,对 Xe IX—Xe XII 各价离子,由 5p-4d 引起的谱线发射在波长位置上彼此分开,没有重叠。在 13.5 nm 附近,只有 Xe XI 离子有大的贡献,所以,为了获得有效的 EUV 辐射输出和最高的转换效率,等离子体中 Xe XI 应该占有尽可能高的丰度。我们对优化的等离子体条件进行了研究与分析,结果表明,在局域热动平衡条件下,等离子体质量密度在从 0.01 g/cm<sup>3</sup> 变化到 0.001 g/cm<sup>3</sup> 的过程中,Xe XI 离子的丰度随密度的减少而增加,最高可达到 50%。

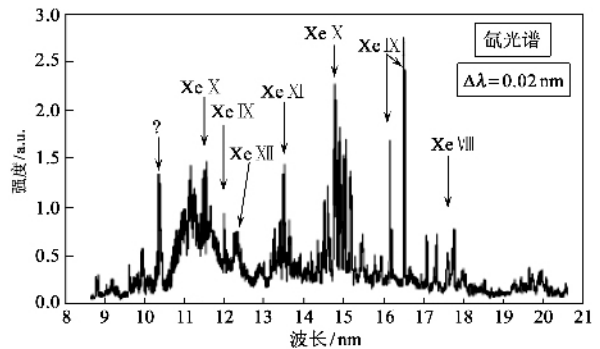


图4 氙等离子体的发射谱<sup>[12]</sup>

一般而言,轻的材料比重的材料在 EUV 区域的吸收弱,因而有些实验采用掺锡的泡沫材料控制 EUV 发射谱。Harilal 等人<sup>[13]</sup>测量了单质锡和掺锡的泡沫材料在 13.5 nm 附近的发射谱,实验结果表明,掺锡的泡沫材料的等离子体连续发射降低,而 13.5 nm 附近的发射变窄,而且优化的 EUV 发射谱所需要的锡浓度要小于 1%。

虽然有不少实验测量了氙和锡等离子体的发射谱,然而等离子体的温度、密度等物理状态却很少能同时准确测定,这不利于对实验结果的理解、分析与解释。有少量实验定量测量了实验中等离子体的密度、温度分布,但却没有同时得到对应的发射光谱。下一阶段的实验研究应该能够同时测量光谱与等离子体物理状态。

#### 4.1.2 理论研究

如前所述,对氙和锡两种等离子体的发射谱,绝大多数理论研究使用统计物理模型进行处理,使用细致谱项/能级模型进行研究的极少。在使用统计模型的研究工作中,相当多的工作围绕共振谱线  $4f-4d$  和  $4d-4p$  进行,而卫星谱线由于数目多,完整的研究不够充分。

对氙和锡等离子体光源的 EUV 发射谱的研究表明,组态相互作用对  $4f-4d/4d-4p$  主线、卫星谱线有强烈的致窄效果,使 13.5 nm 处的发射增强。对于氙和锡等各价离子共振发射谱线  $4f-4d/4d-4p$  的整体特性,如平均能量、总谱线强度、方差以及跃迁系的间隔等也有很多理论方面的研究工作。

White 等人<sup>[14]</sup>使用不可分辨跃迁系模型研究了锡等离子体的发射谱,并与实验进行了初步比较。理论结果在 43 eV 和 46 eV 时与实验符合较好,其他情况下差异很大。事实上,实验中没有准确测量等离子体温度、密度等物理状态,因而在这两个温度下,两者的符合也不能充分说明理论与实验的符合程度。

Gilleron 等人<sup>[15]</sup>使用激光产生的氙等离子体实验研究了 EUV 发射光谱特性,对涉及到的有关跃迁进行了详细计算,不过没有包括完整的卫星谱线。为了更完整地包括所有应该考虑的谱线跃迁,他们进一步使用超级跃迁系模型对等离子体发射谱和辐射不透明度进行了计算。Sasaki 等人<sup>[16]</sup>研究了卫星线对 EUV 发射谱的贡献,等离子体中不同离子丰度使用碰撞辐射模型确定,而原子参数则使用组态平均模型,激发组态包括了激发电子可激发到主量子数为 8 轨道角动量量子数为 3 的轨道。

目前,对氙和锡各价离子的详细光谱信息还非常有限。Churilov 和 Ryabtsev<sup>[17]</sup>分析了 13—16 nm 真空火花激发的 Sn IX—Sn XII 光谱,得到了相关离子的能级结构与谱线信息。

#### 4.2 等离子体的吸收性质

如前所述,EUVL 一个关键的问题就是优化等离子体物理条件,从而获得最高转换效率的高功率 EUV 输出。这样就需要有效地控制等离子体的辐射输运过程,而吸收系数(或辐射不透明度)是确定辐射输运过程的一个关键物理量。在等离子体中,下列四种过程对吸收系数有贡献:束缚—束缚,束缚—自由,自由—自由和散射过程。

等离子体在产生 EUV 辐射的同时,材料本身也会吸收 EUV 辐射,人们已开展了等离子体对 EUV 辐射的吸收引起的有关物理效应的研究。Tao 等人<sup>[18]</sup>使用单色 EUV 成像仪,实验研究了激光产生的锡等离子体在 13.5 nm 处的 EUV 发射空间分辨的图像,虽然采取了措施以减少周围等离子体的吸收,但实验结果表明,由等离子体引起的重新吸收对有效获取 EUV 辐射还是起着关键的作用。

然而,对处于确定状态(如局域热动平衡、碰撞—辐射平衡等)的等离子体吸收性质的定量测量以及理论研究还非常少。最近,Fujioka 等人<sup>[19]</sup>实验研究了不透明度对激光产生的锡等离子体 EUV 发射引起的物理效应。他们首次定量测量了均匀锡等离子体在 EUV 区域的吸收谱,实验结果表明,控制等离子体的光学深度对获得高的转换效率至关重要。图 5 给出了他们的实验结果,点线为原始数据,实线为考虑分辨率以后的光谱曲线,图中同时给出了使用 HULLAC 程序得到的理论光谱,虚—点线、虚线、点线分别对应温度 20.9, 31.0, 40.3 eV。

容易看出,所给 3 个温度下任何一个理论结果都与实验存在很大的差异,所有的理论光谱在 13.5 nm 处都比实验谱宽。而锡等离子体在 13.5 nm 波长附近的吸收很强,因而等离子体光源中的 EUV 辐射会受到等离子体的重新吸收,体现出很强的不透明度效应,这种效应随等离子体空间大小而不同。通过对不同厚度 Sn 等离子体的 EUV 发射的研究表明,13.5 nm 波长附近的辐射主要是 10 nm 以内的等离子体层发射的,高于 10 nm 以上的部分发射谱有一平顶,甚至有一个明显的吸收结构,表明扩展的等离子体层内强烈吸收 13.5 nm 波长附近的辐射。因此为了获得最优的 EUV 输出,有必要控制等离子

体的密度、长度等影响光学厚度的物理量。

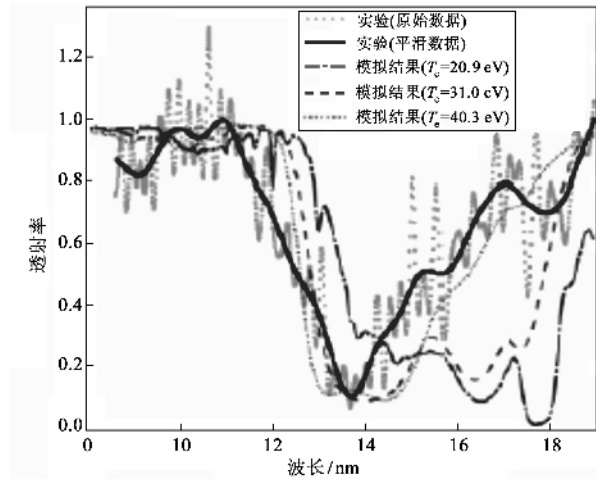


图5 实验测量的锡等离子体吸收谱与 HULLAC 理论光谱的比较<sup>[19]</sup>

Lysaght 等人<sup>[20]</sup>实验研究了中性及低价锡离子 (Sn I – Sn IV) 在 13.5 nm 附近的相对光电离截面, 结果表明, 中性及低价锡离子在 13.5 nm 附近对辐射不透明度也有一定的贡献。

## 5 结束语

由于现代集成电路小型化的迫切需求, 下一代光刻光源, 即波长为 13.5 nm 的 EUV 光源引起了世界范围的强烈关注和重点研究。目前的研究表明, 10 价电离的氙和 8—12 价电离的锡离子在 13.5 nm 波长处有很强的发射, 是最有可能作为 EUV 光源的材料。在相同的激发条件下, 气体放电产生的锡等离子体的 EUV 辐射转换效率是氙的两倍。激光和气体放电产生的氙和锡等离子体光源都有可能最终实现大规模生产的要求, 两者之间有竞争, 但是目前国际上能够达到的最高功率只有满足大规模生产要求功率的五分之一到三分之一。对气体放电等离子体光源, 主要的挑战在于放电的电极系统的热控制及其寿命; 对激光产生的等离子体光源, 主要的挑战在于发展高功率的脉冲激光系统。同时, 两种光源也都面临与屑片相关的光学系统寿命的严峻挑战。由于实验分辨本领的限制和候选材料原子结构的复杂性等方面的原因, 目前可获得的氙和锡材料各价

离子的详细光谱信息非常有限, 精确的理论数据十分缺乏, 所有这些都要求我们发展精确的计算中高 Z 等离子体光谱的理论模型与计算方法, 提供精确的发射与吸收物理参数。这一方面是为实验设计提高能量的转换效率提供理论指导, 另一方面是为等离子体辐射输运等研究领域提供高质量的物质材料参数。最近 EUV 光源已经应用于亲笔文书的光刻技术, 显示了初步的效果和极强的应用前景。有理由相信, 随着对 EUV 光源研究的继续深入以及工艺技术的不断发展, 在不远的将来, 在半导体器件和集成电路的小型化等诸多方面的应用上, EUV 光源必将取代现今使用的光源。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 谢常青, 叶甜春. 半导体情报, 2001, 38 :28[ Xie C Q, Ye T C, Semiconductor Information, 2001, 38 :28( in Chinese )]
- [ 2 ] 程元丽, 李思宁, 王骥. 激光技术, 2004, 28 :561[ Cheng Y L, Li S N, Wang Q. Laser Technology, 2004, 28 :561( in Chinese )]
- [ 3 ] Gohil P *et al.* Appl. Phys., 1985, 24 :2024
- [ 4 ] Zeng J L, Yuan J M, Lu Q S. Phys. Rev. E, 2001, 64 :066412
- [ 5 ] Winhart G *et al.* J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 1995, 54 :347
- [ 6 ] Banine V, Moors R. SPIE, 2001, 4343 :203
- [ 7 ] Bijkerk F *et al.* J. X-Ray Sci. Technol., 1992, 3 :133
- [ 8 ] Juschkin L *et al.* J. Phys. D, 2002, 35 :219
- [ 9 ] Masnavi M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89 :031503
- [ 10 ] Cheng Y C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90 :023116
- [ 11 ] Zeng J L, Jin F T, Yuan J M. Front. Phys. China 2006, 1 :468
- [ 12 ] Bowering N, Martins M, Partlo W N *et al.* J. Appl. Phys., 2004, 95 :16
- [ 13 ] Harilal S S *et al.* J. Phys. D, 2006, 39 :484
- [ 14 ] White J *et al.* J. Appl. Phys., 2005, 98 :113301
- [ 15 ] Gilleron F *et al.* J. Appl. Phys., 2003, 94 :2086
- [ 16 ] Sasaki A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 85 :5857
- [ 17 ] Churilov S S, Ryabtsev A N. Phys. Scr., 2006, 73 :614
- [ 18 ] Tao Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 87 :241502
- [ 19 ] Fujioka S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95 :235004
- [ 20 ] Lysaght M *et al.* Phys. Rev. A, 2005, 72 :014502