

角度分辨光谱技术及其应用

赵景怡^{1,2,3,4}, 赵茂雄^{1,2,3,4*}, 石磊^{1,2,3,4**}, 资剑^{1,2}¹复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433;²复旦大学微纳光子结构教育部重点实验室, 上海 200433;³上海微纳制程智能检测工程技术研究中心, 上海 200433;⁴复旦大学-光检测与光集成校企联合研究中心, 上海 200433

摘要 光谱是物质的光学指纹信息,是研究光与物质相互作用的重要手段。角度分辨光谱技术是对光谱在角度维度的进一步解析,能够分辨光的强度、偏振态和相位等信息,从而在生物医学、材料科学和微纳光子学等研究领域得到广泛应用。为了实现角度分辨光谱,目前已经开发了多种实验系统,并涌现出了大量数据处理算法。本文将介绍角度分辨光谱的生成方法、数据处理技术及其在不同研究领域中的应用。

关键词 角度分辨光谱; 光学逆散射问题; 光学散射成像; 光学特征尺寸; 缺陷检测

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230860

1 引言

角度分辨光谱(ARS)是指光强随角度和波长的分布。如图1所示,此处的角度包括光的入射角 θ_{in} 、出射角 θ_{out} 、入射光和散射光的方位角 φ 等。角度分辨光谱技术是一种利用角度分辨光谱来分析物质的性质和形态结构的测量技术,本质上是探测光与物质相互作用的散射信息,结合先验知识,通过数据分析研究物质的物理、化学、生物等特性。这种技术相较于扫描电子显微镜^[1]、原子力显微镜^[2]等非光学测量手段,具有快速、非接触、和无损等优点。其主要的实现方式有机械运动式变角度测量法^[3-9]和傅里叶平面成像法^[10-12]等。并且,角度分辨光谱中可以提取的信息较为丰富,比如相位、色散关系、偏振态、反射率、透射率、物体的形貌结构^[13-17]等。

蕴含在角度分辨光谱中的信息,需要使用理论与合适高效的模拟仿真以及后处理算法进行深度挖掘与预测。其中,模拟仿真通常使用严格耦合波分析(RCWA)^[18]、有限元法(FEM)^[19]、时域有限差分(FDTD)^[20]等算法,得到基于理论模型的仿真信号。在角度分辨光谱的不同使用场景中,需要的后处理算法也不尽相同。在研究微纳结构的光场调控能力时,需要使用角谱法(ASM)从某一平面的复振幅分布推

测其后的光场传播行为^[9,21]。在光学逆散射问题中,研究者在分析角度分辨光谱数据时,往往并不知道样品确切的物理性质和结构,所以与分析正向问题不同,无法直接从结构推测现象、预测轨迹,而是需要使用逆向思维从角度分辨光谱所在的数据空间反演映射到散射目标的具体特征所在的参数空间。逆散射问题的解决方法有多种,目前应用较为广泛的有库搜索算法^[22-23]、最小二乘法^[24-25]和神经网络算法^[26-27]等。大多数经典技术适用于完全已知边界条件下的整体测量或强线性化假设,这在散射成像中通常是不可行的,因此需要更复杂的非线性分析方法重建目标图像^[28]。例如:在共聚焦非视距成像中,可以使用光锥变换求出更准确的反演解^[29];在扩散光学层析成像中,利用深度神经网络反演李普曼-施温格尔积分方程恢复动物体细胞的位置^[30];在光学衍射层析成像中,可以利用在一阶波恩近似下二次谐波与弱散射介质中非均匀非线性结构的关系重构图像^[31]。

为了满足人们对半导体芯片表面的质量监测^[32-33]、探究地表的形貌特征^[34-35]、发现人工制造的新材料的未知特性^[36-37]、发明无创高效的医学成像技术^[38]等需求,经过深度信息挖掘的角度分辨光谱在物理学、天文学、生物医学等领域都有广泛的应用。例如:角度分辨光谱在光学临界尺寸测量中具有参数解耦的作用,使用

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-06-25

基金项目: 中国博士后科学基金会(BX20220093)、上海市科技委员会(19DZ2253000, 19XD1434600, 2019SHZDZX01, 20501110500, 21DZ1101500)、国家自然科学基金(91963212, 12221004, 12234007)、国家重点研发计划(2021YFA1400603, 2022YFA1404800)、上海市青年科技启明星扬帆专项项目(23YF1415300)

通信作者: *maoxzhao@fudan.edu.cn; **lshi@fudan.edu.cn

它进行数据分析可以更准确地确定周期性结构的轮廓参数^[39];动量空间成像技术既可以扩大成像系统的数值孔径,提供更高的成像分辨率^[40],也可以用于探究光子晶体、超构表面、超材料等微纳结构的特性^[41];在散射成像中,获取多角度的光强信息进行空间复合和空间滤波可以减少成像的噪声^[42-43],多角度全内反射荧光成像可以进行三维超分辨活细胞成像^[44];地球表面的阳光反照率可以从角度分辨光谱中通过双向反射分布函数模型的反演和角度积分获得^[45]。

本文的主体架构如图 1 所示,角度分辨光谱的产生、数据分析和应用三者相辅相成,光谱的产生方式限

制了数据分析的方法和应用的场景,同样地,研究者需要提取的信息和应用场景不同,对应的光谱生成方式也不同,而应用场景和算法的有效性与准确性也通常相互影响、制约。本文将首先介绍角度分辨光谱的生成方法;其次介绍在动量空间成像、光学逆散射问题中如何分别利用算法从大量的角度分辨光谱数据中提取出需要的信息,展现在测量中变角度的重要性;然后介绍角度分辨光谱技术的应用(如:测量材料的光学常数、表征材料的轮廓和缺陷特征、研究微纳光子材料的光学性质、光学散射成像以及其他应用);最后展望角度分辨光谱技术的应用前景。

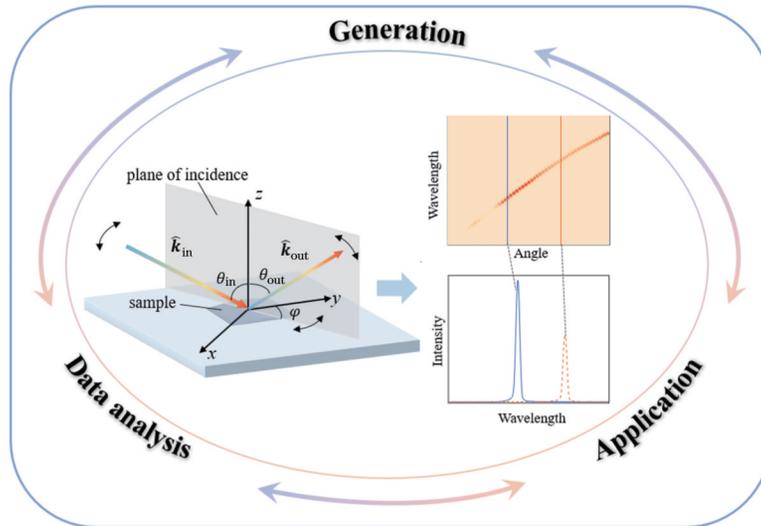


图 1 以角度分辨光谱为核心的文章主体架构图

Fig. 1 Main structure diagram of the article with angle-resolved spectrum as the core

2 角度分辨光谱的生成方法

角度分辨光谱的生成方式通常指光波在角度和波长两个维度上的解析。当引入偏振、相位、时间等维度时,可以进一步丰富光谱的解析能力。在角度的解析方面,常见的方法包括机械运动式变角度测量法、傅里叶平面成像法以及其他相关技术,本文将详细介绍这些方法。

另一个重要的方面是波长的解析,它是角度分辨光谱技术中的一个关键环节。为实现波长的解析,可以采用滤光片、光谱仪和激光器等设备。滤光片通过选择性透过或吸收特定波长的光来实现波长的解析;光谱仪利用衍射光栅或棱镜将不同波长的光波分散成不同角度或位置,并进行测量和记录;而激光器则能够产生单一波长、高亮度、相干性强的激光光源,通过使用不同波长的激光可以实现波长的解析。这些波长解析方式是比较常见的,并且能够满足不同实际应用的需求,在本文中不再赘述。

2.1 机械运动式变角度测量法

机械运动式变角度测量法通常使用步进式电机带动转臂、样品台、反射镜旋转,或者带动透镜在垂直于

光路光轴的方向上移动,这几种手段均可以改变光的入射角、接收角和方位角,随后通过光谱仪、电荷耦合器件图像传感器(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)等探测器采集到样品散射光的变角度光谱信息。本文将分别举例说明如何使用以上方法实现光路变角度入射和接收。

Maria等^[46]提出了可以在入射面内外扫描的穆勒矩阵散射椭偏法(MMSE),该方法的装置示意图如图 2 所示。MMSE由多个高通量光源、偏振态发生器(PSG)、样品、偏振态分析仪(PSA)和两个可选探测器组成。多个激光光源可以根据测量需求耦合进入系统,样品台的转动可以改变入射角的大小,接收臂既可以在入射面旋转,又可以垂直于入射面旋转,便于接收多维度的光强信息。值得注意的是,变角度光谱测量系统通常都需要对角度或偏振态进行校准。在MMSE中,转台和转臂转过的角度可以由电机步长直接确定,借助几何关系可以计算出入射角和接收角的大小,但是对于偏振态,为了求解样品的穆勒矩阵,这篇论文使用了鲁棒特征值校准方法得到了系统中 PSG 和 PSA 的矩阵。

通过机械转臂改变入射角和接收角,这对于光路

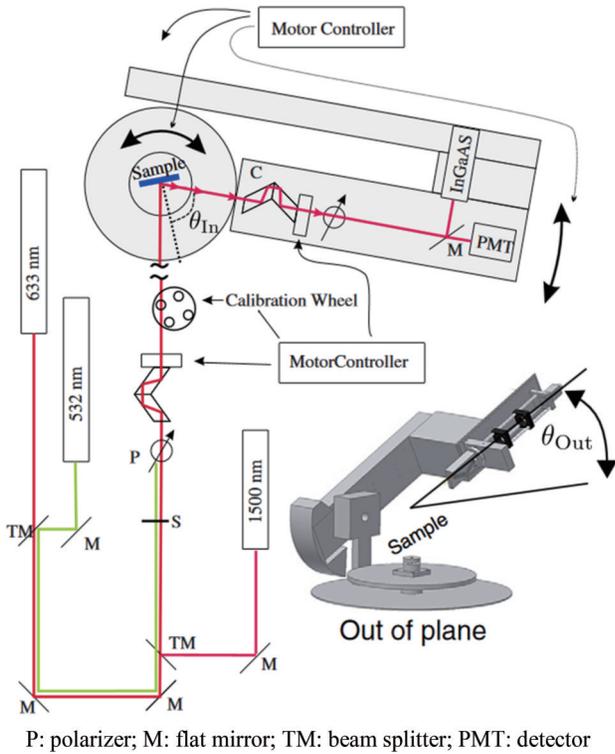


图 2 MMSE 系统示意图^[46]

Fig. 2 Schematic diagram of MMSE system^[46]

系统的整体稳定性而言是巨大的挑战,因此许多变角度光谱测量技术选择旋转反射镜、透镜或样品台。Patrick 等^[4]使用的测角光学散射仪(GOSI)如图 3 所示,通过旋转样品台改变光的入射角,对目标的 s 偏振和 p 偏振的镜面反射进行面内测量,光源为 266~633 nm 波长范围的激光。除镜面反射测量外,该仪器

具有在几乎任何入射和散射角度组合下进行全半球散射测量的灵活性。

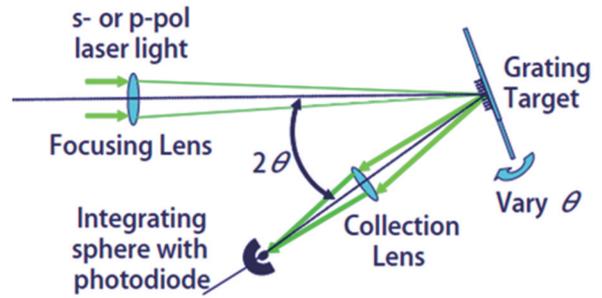
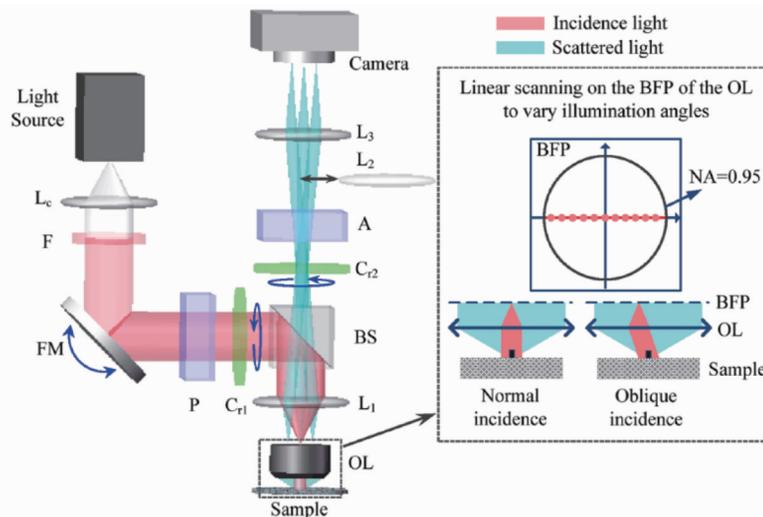


图 3 使用 GOSI 收集镜面反射信号时入射光束、目标和探测器的示意图^[4]

Fig. 3 Schematic diagram of incident beam, target, and detector when collecting specular reflection signal with GOSI^[4]

Chen 等^[47]研制的层析穆勒矩阵散射计(TMS),光源为宽带白光,通过旋转反射镜改变入射光束聚焦在高数值孔径物镜的后焦面上的位置,从而改变光的入射角度,如图 4 所示。该装置采用双旋转补偿器结构,照射到样品上的光为平面波,对于每个照明方向,通过对物镜的后焦面成像以收集其散射场分布,包括的方位角范围为 0°~360°。沿各个观测方向的偏振散射场可以看成散射穆勒矩阵的形式,TMS 能够比传统的光学散射计采集更多的散射信息,保证了其具有更好的测量灵敏度和精度。同样地,TMS 需要对入射角和光学元件的偏振态进行标定。此工作使用一维光栅对入射角进行标定,使用标准薄膜样品和球面镜分别对除物镜以外的原件和物镜的穆勒矩阵进行标定。



F: filter; FM: flat mirror; P: polarizer; A: analyzer; C₁, C₂: rotating compensators; L_c, L₁, L₂, and L₃: lenses; BS: nonpolarizing beam splitter; OL: objective lens

图 4 TMS 系统示意图^[8]

Fig. 4 Schematic diagram of TMS system^[8]

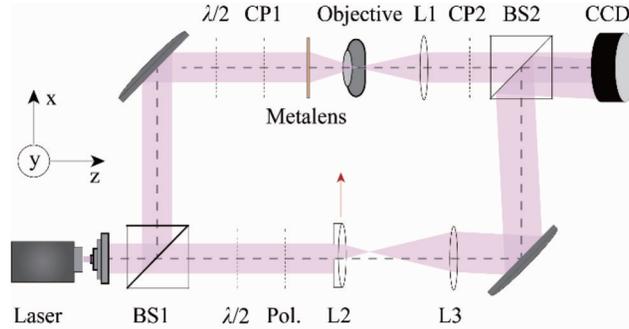
在垂直于光路光轴方向上平移透镜可以改变聚焦光斑在焦面上的位置,此方案同样可以改变入射角。

Zhao 等^[9]设计了一种干涉成像相位测量系统,如图 5 所示。激光经扩束镜获得了平面波前,随后通过分束器

(BS1)分为两束光:物光和参考光。在物光光路中,使用一个物镜和一个消色差双透镜在 CCD 上对样品进行成像。在参考光的光路中,改变透镜 L2 在 x 方向的位置,使参考光以一定角度入射到 CCD 上,实现离轴干涉。

尽管机械运动式变角度测量法可以灵活、直观地改变光波的入射和出射角度,但其在测量速度与系统稳定性方面存在一些限制。测量速度受到机械部件的

响应时间和移动速度的限制,可能导致光谱获取速度较慢,尤其在需要高角度分辨率时更为明显。此外,机械移动部件的磨损和松动问题可能影响角度的准确性和稳定性,长时间使用和频繁移动可能导致性能下降或需要维护和校准。同时,机械移动引入的噪声和振动可能对光谱测量的精度和稳定性造成影响,特别是在对分辨率和灵敏度要求较高的应用中,可能引起信号不稳定和误差增加的问题。



BS1, BS2: beam splitters; L1, L2, L3: lenses; CP1, CP2: circular polarizers; $\lambda/2$: half wave plate; Pol: linear polarizer

图 5 干涉成像相位测量系统示意图^[9]

Fig. 5 Schematic diagram of interferometric imaging phase measurement system^[9]

2.2 傅里叶平面成像法

不同于 2.1 节描述的需要移动光学元件甚至移动入射光路和探测光路的角度分辨光谱产生方式,傅里叶平面成像法无需扫描,测量速度较快、光谱范围广、动量分辨率高^[48]。该方法利用光学透镜进行光学傅里叶变换来获得动量空间信息,而不是数值傅里叶变换,它不需要逐个位置扫描或角度扫描,并且适用于尺寸较微小的样品。下面将简要介绍傅里叶平面成像法的理论依据。

当光学透镜的输入放在前焦面,输出放在后焦面时,输入和输出将产生准确的傅里叶变换关系^[40]。如图 6 所示,前焦面输入的光的极角和方位角分别为 θ 和 ϕ ,它的动量 p_{\parallel} 在样品面上的投影为

$$p_{\parallel} = (k_0 \sin \theta \cos \phi, k_0 \sin \theta \sin \phi), \quad (1)$$

式中: k_0 为波矢的大小。光通过透镜聚焦在后焦面上位置使用 r_{BFP} 表示,根据阿贝正弦条件:

$$r_{\text{BFP}} = (a \sin \theta \cos \phi, a \sin \theta \sin \phi), \quad (2)$$

式中: a 为与透镜焦距和环境折射率有关的因子。根据式(1)和式(2)可知,前焦面上的 p_{\parallel} 可以映射到后焦面上的 r_{BFP} ,表明后焦面上的光强分布可以看作样品光的面内动量分布。

如图 7 所示,Zhang 等^[13]设计的动量空间成像光谱(MSIS)系统由三部分组成:动量空间成像模块、光谱成像探测模块和相位分辨测量模块。在动量空间成像模块中,使用光学透镜进行光学傅里叶变换并获得其后焦面上的动量空间信息,并且使用了平面校正复消色差物镜代替单一透镜用于消除光学像差。随后使用

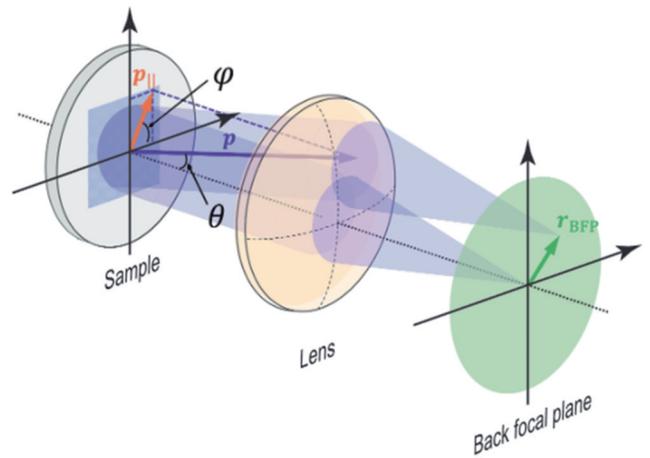
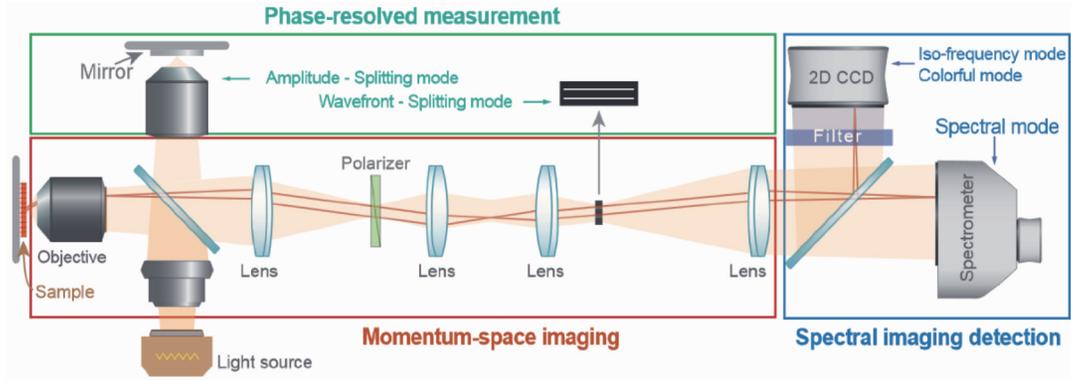


图 6 光学透镜实现的二维光学傅里叶变换的示意图^[13]

Fig. 6 Schematic diagram of the two-dimensional optical Fourier transform realized by an optical lens^[13]

4个消色差双胶合透镜将物镜后焦面成像在探测器上。在一次拍摄中捕获的动量空间光谱信息将由 MSIS 的光谱成像探测模块接收,测量效率较高,光源可以根据测量需求选择单波长激光光源或白光光源,相应地,探测器可以选择单色或彩色 CCD 以及成像光谱仪。相位分辨测量通过干涉法实现,包括分波前模式和分振幅模式两种工作模式。与其他方法类似,此系统需要通过标准光栅的衍射进行校准,从而确定探测器像素元位置对应的动量值。另外,对于 2.1 节中提到的层析穆勒矩阵散射计^[47],其中的样品散射光接收光路也应用了傅里叶平面成像法。

图 7 MSIS 系统示意图^[13]Fig. 7 Schematic diagram of MSIS system^[13]

傅里叶平面成像法能够快速、一次性地获取各个角度的光谱,但该方法受到物镜数值孔径的限制,限制了其可分辨的角度范围。此外,傅里叶平面成像法对成像系统具有严格的要求,需要对每个光学元件进行校正,以解决广谱消像差和色差的问题。

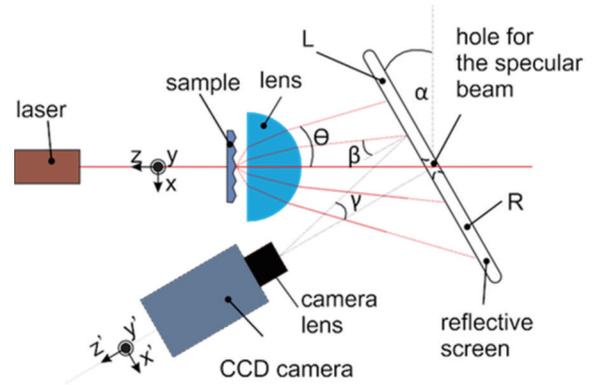
2.3 其他方法

除 2.1 和 2.2 节中介绍的两种应用较广泛的方法外,还存在一些使用其他原理获取角度分辨光谱的方法。Shyu 等^[49]使用空间光调制器的相位调制来模拟菲涅耳透镜,将入射平面波调制并聚焦于物镜的后焦平面。通过调制空间光调制器来调节菲涅耳透镜的中心位置,可以改变物镜焦平面上焦点的位置,从而改变入射光的角度,其中入射光的角度范围取决于物镜的数值孔径。

Jošt 等^[50]研究出了一种利用数码相机测量散射光的三维角分布函数(ADF)的系统,该系统快速、紧凑、元件无需移动,并且能够在完整的半球上使用 ADF 量化光学散射。如图 8 所示,光源为准直激光,样品的散射光通过一个半球形透镜照射到高反射性和扩散性的倾斜屏幕上,利用相机拍摄图像。其中,透镜的作用是缩小光束的角分布以减小屏幕的面积,同时,为了消除镜面反射光束的影响,在屏幕上打孔使光束能够传输到系统之外,避免再次反射回样品表面。对于倾斜屏,采用了椭圆形状的孔,可以避免相机中强度过曝和像素串扰的影响。与传统的角度分辨光谱系统相比,此系统中的角度分辨率随屏幕倾斜的角度而变化。在此系统的标定过程中,根据屏幕上光斑的位置,光束的立体角对应不同数量的像素。同时,光束被投影到屏幕上的位置取决于屏幕倾斜的角度 α 和光束的发射角度 θ ,根据几何关系,将屏幕上的光斑转换为 ADF 的角度和强度。由此,样品的三维 ADF 可以从 CCD 拍摄的数字图像中确定。

人们为了在实验中更高效地得到高分辨率角度分辨光谱,研发出了许多技术手段,包括但不限于本节描述的几种方式,但是仅仅获得角度分辨光谱是远远不够的,人们最关心的是光谱中携带的丰富信息。本文

将于第 3 节详细介绍角度分辨光谱中数据的提取和分析过程,以及角度变化在不同应用场景中起到的关键作用。

图 8 利用数码相机测量散射光的 ADF 的系统示意图^[50]Fig. 8 Schematic diagram of a system for measuring ADFs of scattered light using a digital camera^[50]

3 角度分辨光谱的数据分析

3.1 角度分辨光谱中蕴含的信息

光是一种电磁波,既可以传递能量,也可以传播信息,它的波函数可以表示为 $U(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \exp\{i[\phi(\mathbf{r}) - \omega t]\}$,其中 $A(\mathbf{r})$ 为波的振幅, \mathbf{r} 表示空间中某一点的位置矢量, ω 表示光的频率, $\phi(\mathbf{r}) - \omega t$ 表示相位,因此强度、频率和相位是光的重要特征。除此之外,光的动量 $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$ (\hbar 为普朗克常数, \mathbf{k} 为波矢) 描述了光的传播方向,光的偏振态描述了光的振动状态,它们都是光波中蕴含的重要信息。而这些信息均可以从角度分辨光谱中提取出来,用于分析样品的独特物理性质,因此,角度分辨光谱被称为样品的光学指纹^[51]。

尽管光波中蕴藏着丰富的信息,但是人们只能通过 CCD、CMOS 等探测器直接探测到它的强度信息,除强度外的其他信息,比如频率、偏振态、相位等,需通过后处理算法从光强随波长或角度的分布挖掘出来。经过一系列图像处理算法也可以从不同角度下光强的分布函数中重建出样品的三维轮廓,通过空间滤波和

空间复合分别筛选出单重散射光,有效减少了散斑干扰,从而达到提高信噪比的效果。通过求解逆散射问题,从角度分辨光谱出发得到样品的轮廓参数或计算出样品的折射率和消光系数。这些信息的提取都需要不同的算法来实现,将在 3.2 节介绍角度分辨光谱的数据处理中的关键算法。

3.2 角度分辨光谱的数据处理中的关键算法

3.2.1 动量空间成像中的数据分析

本文在 2.2 节介绍了傅里叶平面成像法,即动量空间成像法,说明了动量空间与实空间的对应关系。更进一步地,在动量空间中,可以通过光子能量和动量的关系,即色散关系,描述微纳光子材料的模式。光子色散决定了微纳光子材料对外部光场的响应,解释了微纳光子材料中产生的各种新奇现象。除此之外,动量空间成像系统还具备相位分辨、偏振分辨、频率分辨等功能。在数值后处理方面,研究者可以使用角谱法计算给定复振幅分布下光场的演化和分布。此外,时域耦合模式理论(TCMT)模型的参数、模式的本征频率和远场偏振态密切相关,通过该模型可以很好地表征微纳结构的光学特性,这些参数可以通过对实验数据的拟合获得。

首先,系统中来自样品面的出射光线的角度通常使用光谱仪探测标准光栅的衍射对其进行定标^[13],测量结果如图 9 所示,得到了光强分别随像素和波长两个维度上的分布,其中,像素可以转化成衍射角。根据 $d \sin \theta = m \lambda$,其中, d 表示光栅常数, θ 为衍射角, m 为衍射阶数,若同时满足阿贝正弦关系,则像素 ρ 与 $\sin \theta$ 和 λ 分别呈线性对应关系。于是,研究者可以获得光强随波长和角度或动量的分布。

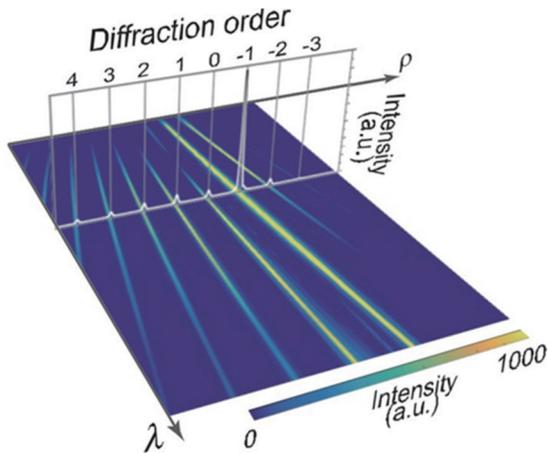


图 9 动量空间中标准光栅的三维衍射光谱^[13]

Fig. 9 Three-dimensional diffraction spectra of standard gratings in momentum space^[13]

通过测量样品的色散函数可以表征纳米光子材料在 (ω, k_x, k_y) 空间中的三维能带结构。具体而言,三维能带结构可以通过两种方式得到,在第一种方式中,使用白光光源,首先需要测量动量空间中沿一个高对

称方向的色散图,然后使样品相对于成像光谱仪的入口狭缝旋转,可以得到不同入射方位角下的色散关系。第二种方式使用单色光源得到固定能量平面与色散表面的交线,即等频率轮廓。然后,改变选择的能量平面,将一系列能量下的等频率图合并在一起,就构成了三维能带。

光学本征模式的激发提供了将光传输到外部环境的有效途径,为了描述共振耗散能量的速率,研究者使用被称为品质因子(Q因子)的参数,它是描述能量损失相对于储存能量的衰减速率的无量纲物理量^[52]。Q因子越大,光子本征模的能量耗散率越低,寿命越长^[53]。通常,在一个光子系统中,一个模式的能量通过多个通道来耗散,例如向远场辐射的辐射通道和吸收导致的非辐射通道。定义辐射和非辐射 Q 因子为

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{2\eta_0}, Q_n = \frac{\omega_0}{2\eta_n}, \quad (3)$$

式中: ω_0 是共振频率; η_0 是辐射衰减率; η_n 是非辐射衰减率。

不同的动量空间探测手段通常需要利用不同的理论分析方法提取 Q 因子。Zhang 等^[13]从 MSIS 系统测量的方晶格等离子体样品的非极化动量分辨反射光谱中提取了 Q_0 和 Q_n 。在此工作中,研究者直接探测到的并非样品的本征辐射,而是样品的共振响应,因此需要使用 TCMT 分析不同通道的能量阻尼特性^[54-56],提取出样品的本征模式。该团队利用 TCMT 计算出以频率为自变量的消光光谱函数模型,并将实验测得的消光光谱与其进行拟合,提取出辐射衰减率和非辐射衰减率,进而通过式(3)计算 Q 因子,结果如图 10 所示。

与上述工作不同的是,Jin 等^[57]使激光的入射角对准微纳光子结构的辐射方向,通过探测正方晶格光子晶体平板在动量空间中经过交叉极化滤波的散射光谱,直接得到了样品的本征辐射,因此在该工作中可以直接使用共振频率与共振带宽的比值计算样品的 Q 因子,结果如图 11 所示。

因为光是横波,所以平面波有特定的偏振态^[58]。Zhang 等^[13]利用动量空间成像系统,通过测量不同偏振下的动量空间消光光谱,基于 TCMT 提取出了方晶格等离子体样品的本征布洛赫模式在向外辐射时在动量空间的偏振态,图 12 为实验测量结果。除此之外,研究者通过探测动量空间的复振幅分布还可以得到样品的本征参量之一:穆勒矩阵,其中携带着样品的全部偏振特性,包括退偏效应^[59]。Hatit 等^[60]提出了一种基于液晶和显微物镜的穆勒矩阵椭偏仪,在 CCD 上成像物镜的后焦面,通过测量后焦面上每一个点对应的穆勒矩阵来实现光栅锥形衍射的表征。在此基础上,Chen 等^[47]研制的层析穆勒矩阵散射计结合了双旋转穆勒矩阵椭偏仪和显微物镜实现了定角度入射测量傅里

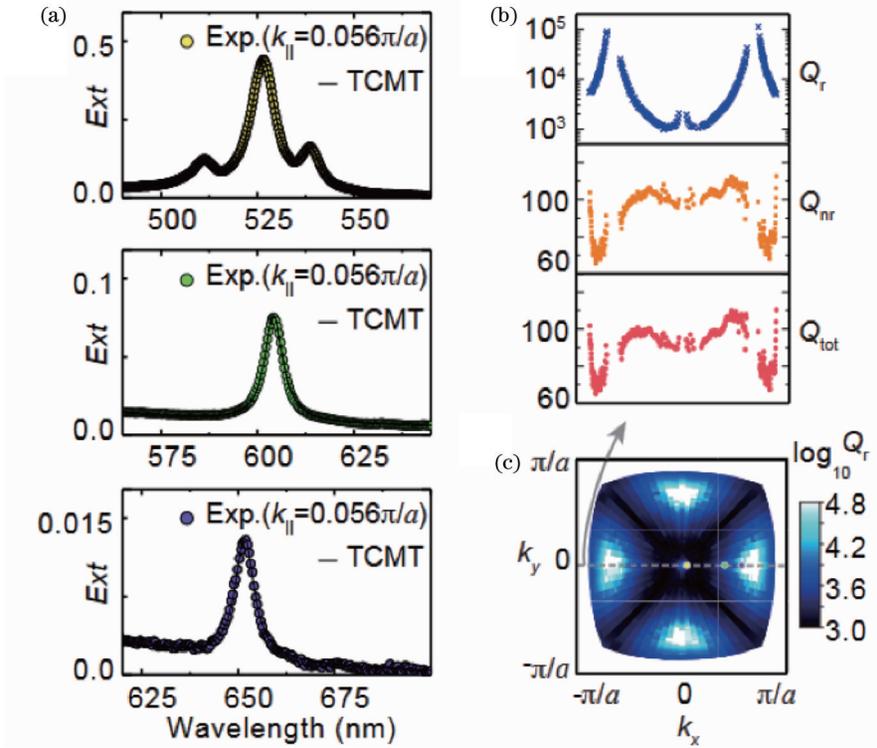


图 10 Q 因子分析图。(a)实验测量的消光光谱(实心点)和时域耦合模式理论拟合的结果(黑色实线),波矢沿着 Γ - x 方向;(b)沿 Γ - x 方向相应的辐射 Q 因子、非辐射 Q 因子和总 Q 因子;(c)实验测量的动量空间第一布里渊区内 Q 因子分布^[13]

Fig. 10 Q factor analysis diagrams. (a) Experimentally measured extinction spectra (solid points) and the result of time-domain coupling mode theory fitting (black solid lines), wave vectors along the direction of Γ - x ; (b) corresponding radiative Q factor, non-radiative Q factor, and total Q factor in the direction of Γ - x ; (c) Q factor distribution in the first Brillouin region of momentum space^[13]

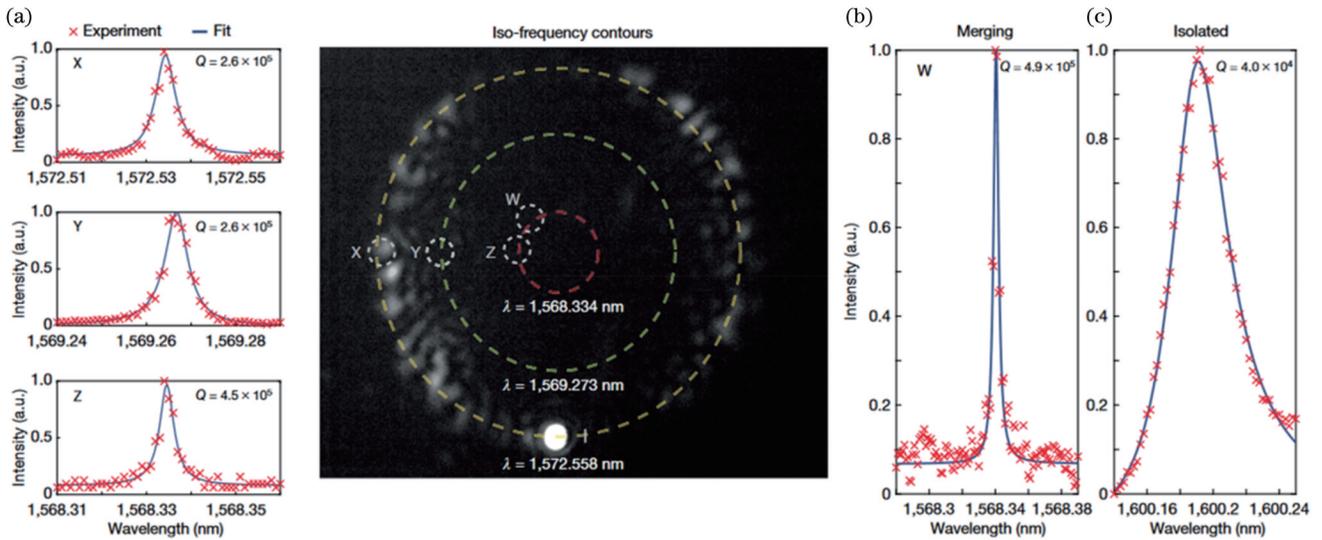


图 11 实验结果。(a)样品在不同波长下的等频线(右),动量空间中不同点(X, Y, Z)的实验测得和对称洛伦兹拟合后散射光强随波长的变化,分别对应不同的 Q 因子(左);(b)(c)在 W 点处合并和孤立连续谱中的束缚态样品光强随波长的变化,分别对应不同的 Q 因子^[57]

Fig. 11 Experimental results. (a) Iso-frequency lines of the sample at different wavelengths (right), experimentally measured and symmetric Lorentz fitting of scattered light intensity with wavelength at different points (X, Y, and Z) in momentum space correspond to different Q factors (left); (b)(c) light intensity of bound state samples in the combined and isolated continuous spectra at point W varies with wavelength, corresponding to different Q factors, respectively^[57]

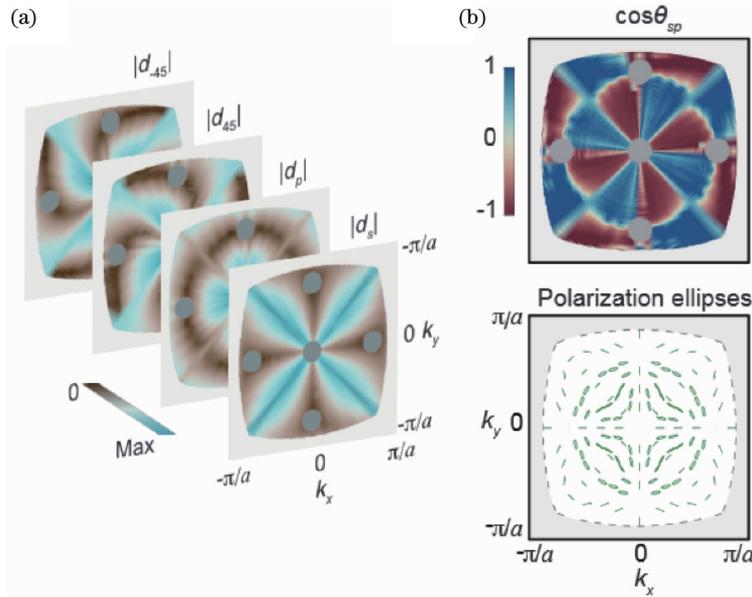


图 12 动量空间偏振态的实验测量结果。(a) s、p 和 ±45° 偏振分量的耦合系数的振幅值；(b) s 分量和 p 分量的相位差余弦分布(上面)与测量的偏振态分布(下面)^[13]

Fig. 12 Experimental measurements of the spatial polarization state of momentum. (a) The measured amplitudes of coupling coefficients for s, p and ±45° components;; (b) phase difference cosine distribution of s component and p component (top) and measured polarization state distribution (bottom)^[13]

叶面上样品的穆勒矩阵,实验测量和理论拟合的结果如图 13 所示。对于后两项工作,在测量样品的穆勒矩阵时,需要不停改变入射与接收到的平面波的偏振态,实验中测得的光强分布也会随之变化,因此每一次得到的光强分布并不是本征的,然而,通过分析计算不同角度下不同偏振态组合的出射光强分布,可以得到傅里叶面上样品的穆勒矩阵,而不是偏振态的分布,样品的穆勒矩阵表征了通过样品的平面波的偏振态变化,该参量并不随实验条件的变化而变化,因此是本征的。对比文献[13]的工作,他们从测量得到的非本征的动量空间反射光谱中提取出了动量空间中微纳光子材料本征模式的偏振态分布,其结果也是本征的。

为了表征动量空间中微纳光子材料引起的相位变化,需要获得动量空间的相位分布,由于光的波动特性,常用复系数来描述光学材料入射光和出射光之间的差异^[61]。动量空间的相位分布主要来源于两个方面:1)由模式共振引起的共振相位;2)由交叉极化时偏振态分布引起的几何相位。二者均反映了不同波矢之间相位的相对分布情况^[62-63],模式共振引发的相位跳变是动量空间中的共振相位产生原因,而动量空间中的几何相位分布来自于交叉极化和动量空间偏振态分布。由于光波的起偏与检偏的偏振方向相互垂直,在它们之间的动量空间中,不同波矢的偏振态不同。在偏振态转化的过程中,相当于从庞加莱球面上的一端到另一端,经过赤道上不同的线偏振态,不同的路径产生了不同的几何相位。

在研究动量空间的相位分布时,根据不确定性原

理,研究者往往使用分振幅干涉,因为在分振幅干涉中,干涉引起的能量重新分布并不发生在动量空间,与能量重新分布发生在动量空间的分波前干涉不同,叠加后的辐射场在动量空间中只对应某一动量,不会影响到其他动量的位置^[64]。研究者们可以使用数字全息技术实现动量空间中相位的测量,实现方式分为共轴干涉光路和离轴干涉光路两种。

Zhang 等^[13]使用 MSIS,利用共轴干涉光路测量了二氧化硅衬底上氮化硅的带状阵列样品在动量空间中的共振相位分布。对于相位测量,需要使用激光作为光源,并在分束器和 CCD 前引入偏振片以控制激发和探测的偏振。首先,分别测量样品和参考反射镜在动量空间中的反射强度分布 I_s 和 I_m ,然后测量样品和反射镜反射的叠加光强 I_{sm} ,二者相位差 ϕ_{sm} 的余弦值可以表示为

$$\cos \phi_{sm} = \frac{I_{sm} - (I_s - I_m)}{2\sqrt{I_s I_m}} \quad (4)$$

提取的动量空间反射相位分布如图 14 右侧所示。与反射模式类似,改变光路照明方式以及参考光和样品光的干涉光路后同样可以测量样品的透射相位。由于计算得到的相位余弦值是偶函数,需要通过轻微改变光程,测量相位是增加还是减小,判定出相位所在的区间。然而,此系统易受气流、激光光源稳定性等影响,测量的重复性和稳定性较低,通常需要测量多次。

另一种动量空间中相位的测量方式为离轴干涉光路,通过引入空间相移,在探测平面上分别接收有样品和无样品时的干涉条纹,随后进行傅里叶变换和滤波

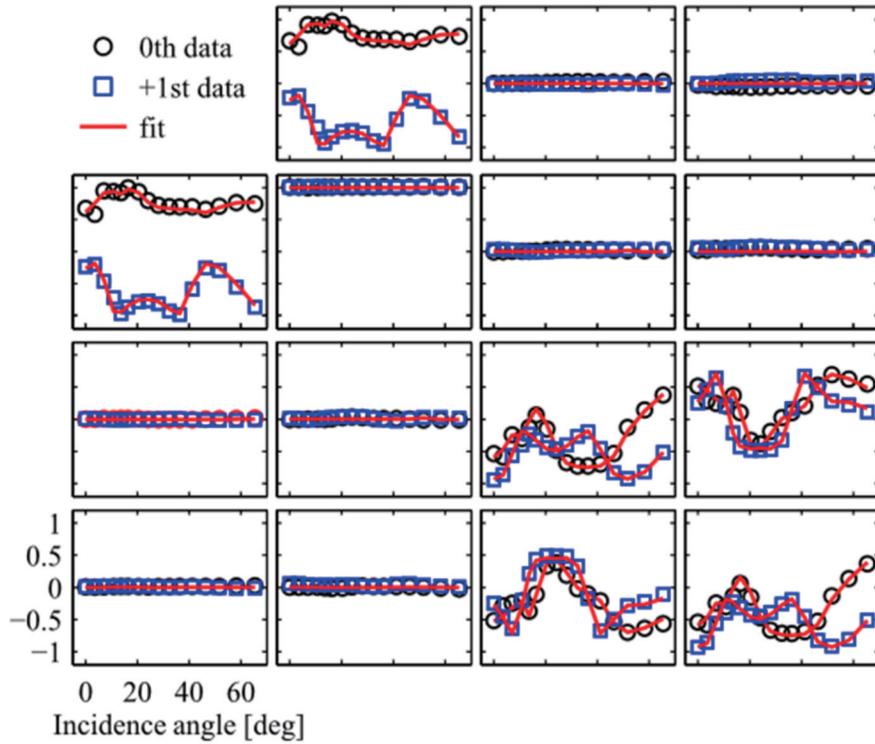


图 13 实验测得的光栅衍射的穆勒矩阵与计算得到的穆勒矩阵的拟合结果^[47]

Fig. 13 Fitted results of the experimentally measured and calculated Mueller matrix of grating diffraction^[47]

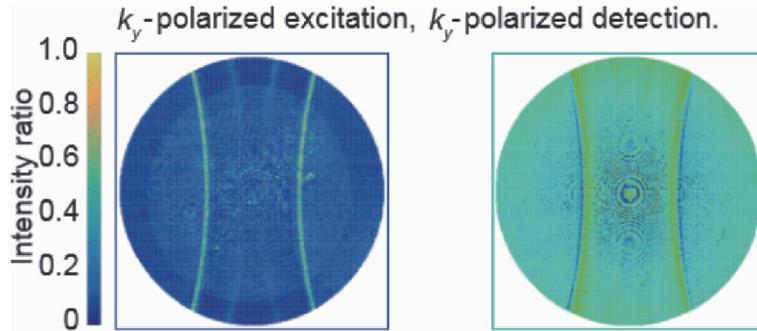


图 14 动量空间中的反射相位^[13]

Fig. 14 Reflection phase in momentum space^[13]

处理,再通过傅里叶逆变换便可以提取动量空间中样品的相位值^[65]。使用这种方式无需对光路进行扰动,并且只需记录两次,鲁棒性较高。Wang 等^[66]使用离轴干涉光路测量了光子晶体薄板动量空间的几何相位分布,测量结果如图 15 所示,得到了明显的相位涡旋分布。

除以上信息外,样品对光场的调控能力同样重要,这种能力可以通过分析样品后的光场分布进行评估。研究者利用傅里叶变换的原理提出了角谱法^[67],其思想为:首先,将实验测得的平面复振幅分布 $U(x, y, z = 0)$ 进行傅里叶变换,将其转化为波矢空间的复振幅分布 $\tilde{U}(k_x, k_y)$,相当于把光场分解成许多不同方向的平面波。随后引入 z 方向的传播距离 Δz ,并将 z 方向的波矢 k_z 附加在波矢空间分布上,最后,进

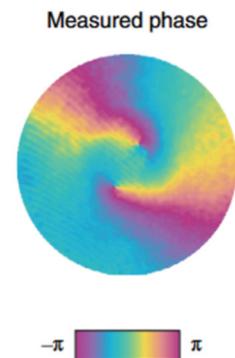


图 15 光子晶体薄板的相位涡旋分布^[66]

Fig. 15 Phase vortex distribution of photonic crystal thin plate^[66]

行傅里叶逆变换,可以得到传播距离 Δz 后的光场复振幅分布:

$$\tilde{U}(k_x, k_y) = \text{FFT}[U(x, y, z = 0)], \quad (5)$$

$$U(x', y', z') = \text{IFFT}[\tilde{U}(k_x, k_y)\exp(ik_z\Delta z)]. \quad (6)$$

从动量空间光谱中提取品质因子、偏振态、相位、色散函数等信息对于研究连续谱中的束缚态等新型光子现象、纳米光子材料的特性等基础研究和应用研究都具有重要意义,本文将在第 4 节详细介绍角度分辨光谱在微纳光子材料研究中的重要应用。

3.2.2 光学逆散射问题中的数据拟合

光学散射测量是一种间接测量技术,通过对探测器测得的光强信息进行分析,可以得到样品的光学特征。通常采用比较理论光学信号和实测光学信号的方法来提取参数,这被称为逆散射问题^[68-69]。典型的逆散射问题由三部分组成:一组散射目标、一组光学响应和一个测量算子。对于散射目标,应建立一个参数空间,其元素为参数数组,描述散射体的几何形状和成分;对于光学响应,需要一个数据空间,其元素对应于远场散射体的实测光学响应,如反射光谱。光学响应的种类较多,例如,通常使用变角度穆勒矩阵描述样品对偏振态的调制情况,几乎所有的样品结构信息都包含在穆勒矩阵的 16 个元素中^[47],也可以通过样品的变角度散射光谱,以波长-角度映射进行表征^[27]。

有许多算法可以用来求解逆散射问题,应用较为广泛的方法有:库搜索算法、最小二乘法和神经网络算法等。在使用库搜索算法时,需要利用理论模拟生成一个光谱库,搜索与测量光谱最佳匹配的光谱,但通常需要较大的库才能保证精度^[22]。在最小二乘法中,基于实际测量误差正态分布且均值为零的原理,我们可以采用最小二乘(LSQ)函数作为目标函数来量化理论模拟得到的计算信号与实测信号之间的差异,使用 Levenberg-Marquardt 算法等优化算法不断调整目标的参数,直至二者的差异最小,此时可以得到全局最优解^[70],其中的 Levenberg-Marquardt 算法综合了牛顿法与梯度法的特点,通过最小化误差的平方和寻找匹配的参数进行求解,对于过参数化问题不敏感,能有效处理冗余参数问题^[71]。

然而,库搜索算法和最小二乘法通常比较耗时,利用神经网络算法将光学特征映射到结构参数相对稳定且高效。神经网络算法作为一种数据驱动的方法,为构建复杂的非线性映射关系提供了统计视角^[72],全连接神经网络^[73]、残差卷积神经网络^[74]等算法不同于最小二乘法,不需要对同类型样品的每次测量都与理论值进行比对^[75]。为了满足机器学习的数据需求,研究者通常利用理论模拟生成数据进行训练,由于这是端到端的计算过程,数据中的噪声会传递到结果中,为此,可以利用先验知识去除神经网络中的噪声^[76]。利用神经网络算法求解逆问题近年来逐渐兴起, Li 等^[27]使用两种典型的神经网络:正向映射型和反向映射型来重建光栅轮廓,具有参数到点结构的正向映射神经

网络在精确解析光子色散方面脱颖而出。如图 16 所示:在反向映射神经网络算法中,将散射目标响应,即角度分辨光谱,输入在模拟数据集上训练的逆映射神经网络,随后输出样品参数的预测值;在正向映射神经网络算法中,神经网络可以被训练为生成器来产生响应,正向映射的全部架构可以完全解析化,能够直接用后向传播算法计算输入参数的梯度。

在逆散射问题的求解过程中,理论模拟的数据可以通过严格耦合波分析^[18]、时域有限差分方法^[77]、有限元法^[78]等方法获取,通过这些方式不仅可以得到反射率,还可以经过琼斯矩阵的转换或傅里叶变换得到穆勒矩阵的元素值^[79-80]。在模拟仿真的过程中需要对研究的结构进行建模,对于相对复杂的周期性结构光栅而言,如图 17 所示,研究者通常将其建构为任意数量任意厚度的薄膜的累加^[81],因此可以对任意光栅轮廓进行任意精度的分析。

非成像光学技术结合多参数拟合为计量应用提供了一种有效的方法,然而,这种拟合的输出结果强烈依赖于所选样本的几何模型,通常根据扫描电镜(SEM)测试的结果建立理论轮廓模型,比如光栅脊的轮廓可以选用如图 18 所示的 5 种模型,甚至还可以选择二次型非对称结构^[14]。用这样的方法可以确定的参数的数量实际上受到实测数据集的限制:如果引入的参数太多,则参数之间会出现强相关性,导致通过算法得到的最优解的准确性下降,为了使逆问题中的参数解耦, Novikova 等^[39]提出了锥形衍射中的光谱穆勒旋光法。在此之前,基于光谱或角度分辨的椭圆偏振的技术几乎只在平面衍射中实现,即光栅脊垂直于入射平面。在这种情况下,不存在交叉极化效应,光栅的光学响应完全由已知的椭圆偏角 Ψ 和 Δ 定义^[82]。如图 19(a)所示,当一维衍射光栅位于不同的方位角时,即在锥形衍射中,可以获得更一般的实验数据。圆锥衍射中的穆勒旋光法能提供与平面衍射中的标准椭圆偏振光谱相同的光栅轮廓信息,其光谱范围是平面衍射的两倍以上。由于光栅脊不再垂直于入射面,光栅的琼斯矩阵不再是对角的,需要使用广义椭圆偏振仪或穆勒偏振仪对其进行完整测量。

在该工作中,研究者使用了如图 18 所示的几种模型和相应的参数用于模拟,图 18(a)~(e)对应模型 I~V。如图 19(b)所示,确定光栅脊的高度,改变入射光的方位角,实验与理论得到的穆勒矩阵的方差随参数 L 与 A 的分布图都有指向最小值的箭头。当方位角为 0° 时,图像具有相当陡峭的斜率和狭窄且平坦的“谷”,椭圆轮廓线的主轴可以用 L 与 A 的线性关系表示,因此 L 增加会导致 A 减小,二者相互耦合;当方位角不为 0° 时,图中等高线的形状发生变化,椭圆的主轴旋转,且椭圆度减小;当方位角为 90° 时,轮廓线在最小值附近几乎变成圆形,这意味着 L 与 A 在锥形衍射中的相关性降低。在图 19(c)中绘制了 5 个研究模型获得的方

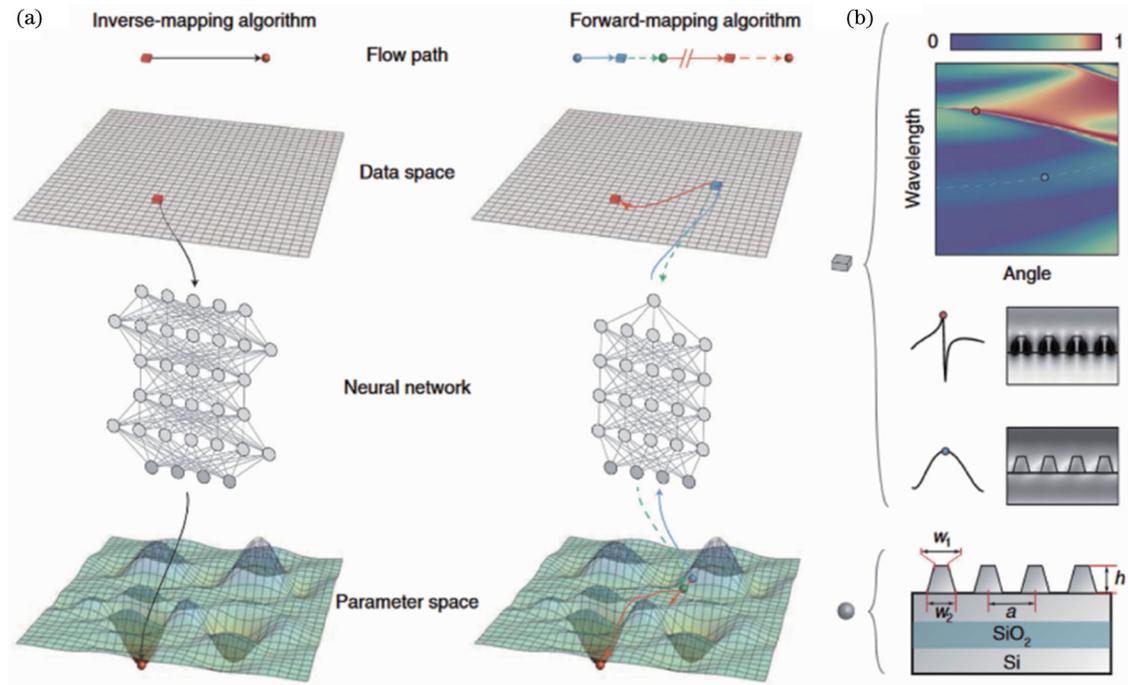


图 16 两种基于神经网络求解逆散射问题的算法。(a) 两种算法的求解过程示意图;(b) 样品的结构示意图与样品的角度分辨光谱图^[27]

Fig. 16 Two algorithms for inverse scattering problem based on neural networks. (a) Solution process diagram of the two algorithms; (b) structure diagram of sample and angular resolution spectrogram of sample^[27]

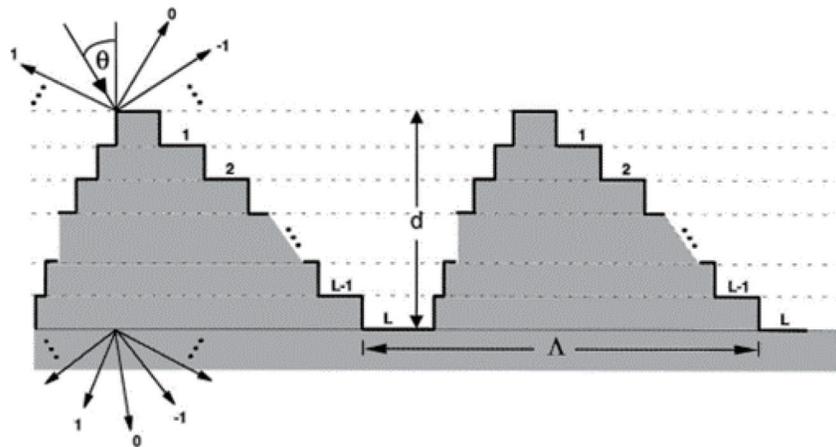


图 17 表面形貌光栅的建模示意图^[18]

Fig. 17 Modeling diagram of surface topography grating^[18]

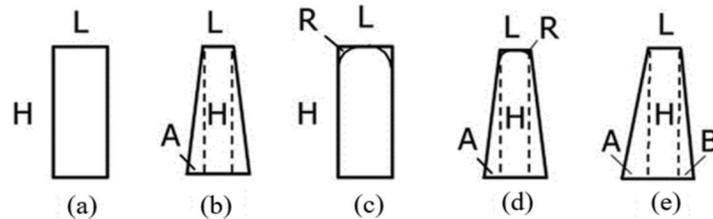


图 18 衍射光栅几何模型及相应的拟合参数组。(a) 矩形 (H, L); (b) 对称梯形 (H, L, A); (c) 顶角圆角长方形 (H, L, R); (d) 顶角倒圆的对称梯形 (H, L, A, R); (e) 非对称梯形 (H, L, A, B)^[83]

Fig. 18 Geometrical model of diffraction grating and corresponding fitting parameter groups. (a) Rectangle (H, L); (b) symmetric trapezoid (H, L, A); (c) top corner rounded rectangle (H, L, R); (d) symmetric trapezoid (H, L, A, R) with a chamfered top angle; (e) asymmetric trapezoid (H, L, A, B)^[83]

差的最小值与方位角的关系,方位角为 0° 时,各模型的方差较接近,无法区分各模型,而方位角不为 0° 时,模型

I、II、III之间的方差差异较大,可以用于区分矩形与梯形光栅脊轮廓,有助于判断光栅脊的实际轮廓构型。

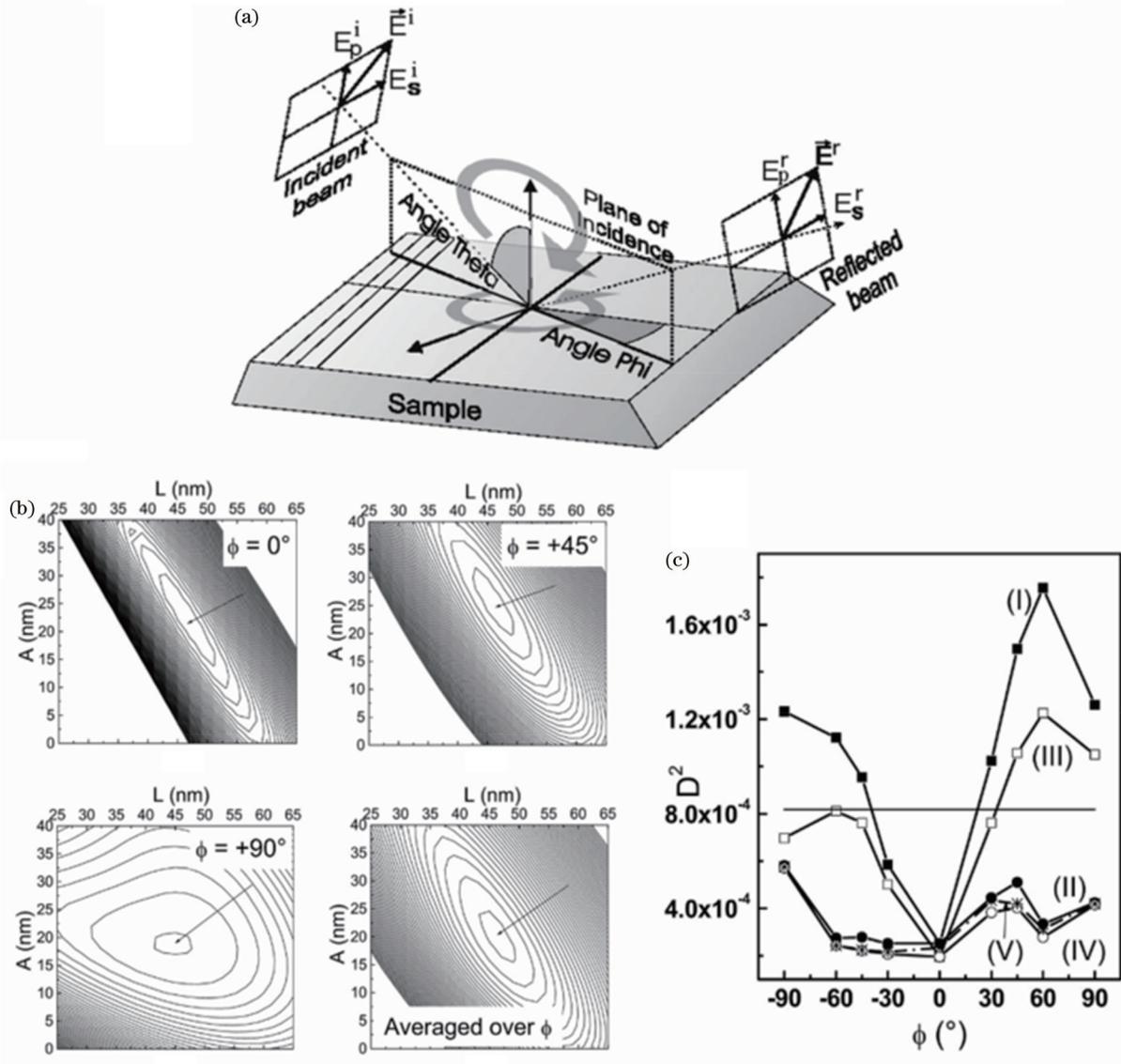


图 19 圆锥衍射示意图与测量结果。(a)一维光栅的圆锥衍射示意图;(b)使用模型 II 在不同方位角下,理论计算与实验测量的穆勒矩阵的方差随 A 和 L 的变化($H=20\text{ nm}$);(c)使用几何模型 I~V 与不同方位角下获得的方差最小值^[83]

Fig. 19 Cone diffraction diagram and measured results. (a) Schematic diagram of conical diffraction of one-dimensional grating; (b) variance of the theoretically calculated and experimentally measured Mueller matrix varies with A and L ($H=20\text{ nm}$) under different azimuths using the model II; (c) variance minimum obtained under different azimuths using the geometric model I~V^[83]

由于光栅的所有特征尺寸都远小于用于测量的最小波长,因此有效介质近似(EMA)是有效的。在这种情况下,光栅可以被视为光轴平行于光栅矢量的单轴薄膜的堆叠。等效各向异性层状介质的反射和透射系数可以通过使用有效的O光折射率和E光折射率以及修正矩阵方法来计算^[84]。由于这些系数只取决于光栅脊的有效宽度,而光栅脊的有效宽度是上底长度和侧壁投影长度的线性组合,因此只能从测量中恢复该组合,在这种情况下无法区分脊的矩形和梯形形状。锥形衍射中的测量消除了这种相关性,从而可以可靠地确定这两个参数,这种方法也适用于测量波长远大

于光栅特征尺寸的情况^[83]。该研究对于光学逆散射问题的参数解耦做出了贡献,有助于研究者们研发出更多参数解耦的方法。

同时,选择恰当的人射角度对于提升测量的准确性起着重要作用。以薄膜样品为例,为了选取合适的人射角,研究者通常使用变角光谱偏振仪(VASE)^[85]通过改变光的入射角获取样品的角度分辨光谱,对比不同角度的光谱可以确认偏振仪测量灵敏度最高的角度:布儒斯特角^[58]。偏振法测量的是反射系数的比值 r_p/r_s ,其中, r_p 表示样品在p偏振方向的反射系数, r_s 表示样品在s偏振方向的反射系数。由于 r_p 和 r_s 的差值

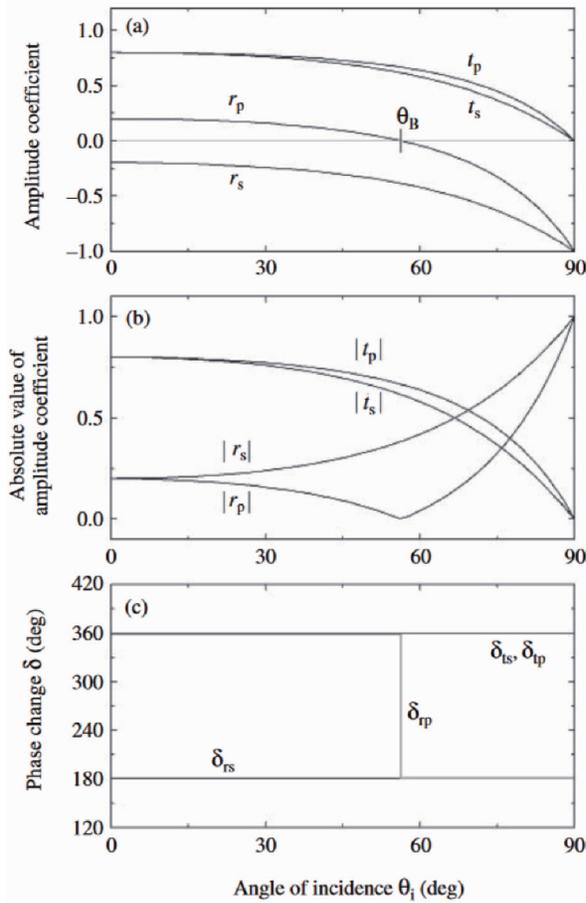


图 20 反射、透射系数与其绝对值,以及空气与玻璃界面相位变化随角度的分布。(a)反射、透射系数的分布;(b)反射、透射系数的绝对值的分布;(c)空气与玻璃界面的相位变化的分布^[58]

Fig. 20 Distribution of reflection, transmission coefficient and its absolute value, and phase change at the interface between air and glass with the angle. (a) Distribution of reflection and transmission coefficients; (b) distribution of absolute values of reflection and transmission coefficients; (c) distribution of phase changes at the interface between air and glass^[58]

在布儒斯特角 θ_B (图 20) 处达到最大,所以在该角度下测量的灵敏度也随之增加,因此薄膜样品的椭偏测量一般在布儒斯特角下进行。这个现象可以从介质界面处的电偶极辐射来解释^[86]。Nestell 等^[87]发现:测量金属薄膜在大角度入射(样品的布儒斯特角附近)下的反射和透射光谱,可以比正入射更准确地得到 1~6 eV 范围内薄膜的折射率和消光系数。对于比薄膜更复杂的结构,以光栅为例,由于研究者使用椭偏仪测量得到的光谱对多层模型参数的敏感性是入射角的强函数^[88],并且根据 RCWA 中对光栅的建模思路,可以将光栅考虑为多层膜堆叠而起的结构,因此测量多个角度的椭偏参数或穆勒矩阵,也可以找到样品测量的最灵敏角度,从而提升测量的准确度。Huang 等^[89]在使用椭偏仪测量光栅的高精度形貌时发现:在正入射附

近很小的形貌变化就会在椭偏光谱中产生明显且实验上容易分辨的变化,而其他角度变化不明显;并且,由临界尺寸(CD)和高度变化引起的椭偏谱的移动方向几乎是正交的。后一点非常重要,因为这意味着可以从椭偏谱中单独提取临界尺寸和高度信息。对于双旋转穆勒矩阵椭偏仪^[90],它可以改变光的入射角和方位角从而提升测量的灵敏度,通过对比不同角度下的穆勒矩阵元测量结果和退偏效应,可以在测量光栅轮廓参数时确定各参数的敏感角度^[8]。

作为光学逆散射问题的一部分,在光学散射成像中,角度分辨光谱对于数据分析起着不可替代的作用。在此过程中,研究者通过分析扩散层和扩散层下目标的散射信号,重建出目标的图像,直观地展示了散射目标的形状和位置。光学散射成像的探测目标往往是非周期的生物体细胞等亚波长结构,散射模型较复杂。研究者收集到的信号中通常包含散斑、多重散射等带来的噪声,可以通过采集角度分辨光谱并进行空间滤波和空间复合减少噪声,提高成像质量。研究者通过不断改变光的入射角、接收角和方位角测量几十个角度的光谱数据,数据量较庞大,因此需要合适且高效的算法将光谱数据重建为样品的像并减少噪声。

X 射线计算机断层扫描(CT)于 1972 年引入临床,是最早的现代断层成像技术^[91],如图 21 所示,X 射线源和探测器对患者的身体部位进行线性扫描,其重建图像的思想为:如果将物体分成一系列具有可计算吸收值的小立方体,那么包含在 X 射线束内的立方体的吸收值之和将等于光路的总吸收。因此,某一角度下测量到的物体对光的吸收形成一系列联立方程中的一个,其中的变量数量等于图片上的像素数量,如果方程多于变量,则可以求解不同深度的扫描切片中每个立方体的光强值,成为最终的图像。受 CT 利用角度分辨光谱重建图像启发,许多无损且高分辨率的光学层析成像系统及相应的算法被开发出来,比如光学干涉层析成像、散斑自相关成像、多角度照明全内反射荧光成像、共焦非视距成像、光学衍射层析成像等,在使用这些成像系统时,变角度光谱测量模块对于提升成像质量起到的重要作用可以在探测到散射信号后的数据分析过程中突显出来。

受 CT 技术的启发,许多光学散射成像技术应运而生,角度分辨光谱也被应用到它们之中。光学干涉层析成像依赖于组织中后向散射光的空间和时间相干性。然而,如图 22 所示,光束在样品内发生了多次后向散射,同时也发生了多次前向散射,将引起散斑的产生,这是一种隐蔽的噪声形式,降低了系统成像的质量。散斑噪声降低了对比度,使得组织中高散射结构之间的边界难以分辨。降斑技术主要分为 4 类:偏振分集、空间复合、频率复合和数字信号处理^[93]。空间复合的实现需要测量不同角度接收到的信号并进行非相干叠加^[94-95]。

pencil beam (1970)

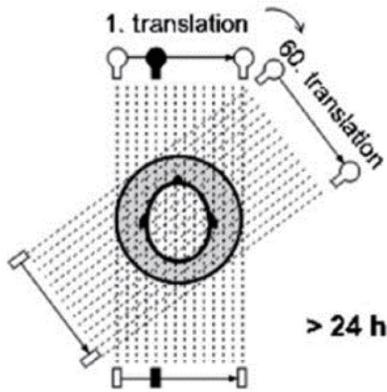


图 21 第一代计算机断层扫描仪示意图^[92]

Fig. 21 Schematic diagram of the first generation of computed tomography scanners^[92]

在光学干涉层析成像等传统成像系统中,散斑总是被当作杂乱的颗粒图案来处理,但是基于角度记忆效应,研究者通过对散斑场做自相关运算并利用算法重构可以得到物体清晰的像,这种成像方式被称为散斑自相关成像^[96]。角度记忆效应由 Feng 等^[97]提出,如图 23 所示,当光的入射角在一定的范围内发生改变时,通过散射介质后的散斑分布图会随着入射角度的改变发生平移,但是整个散斑分布图的特征保持不变,且在这个范围内的散斑分布图之间具有很高的相

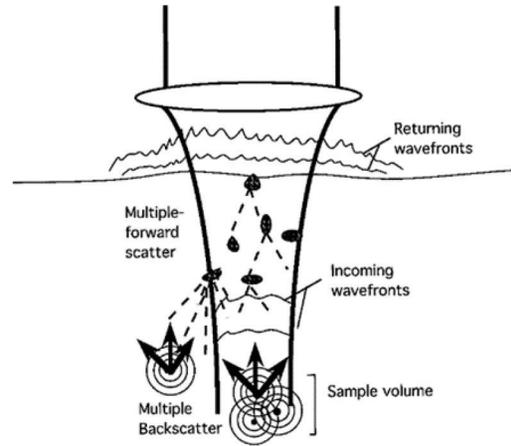


图 22 聚焦光束在组织中的传播^[93]

Fig. 22 Propagation of focused beam in tissue^[93]

关性。然而,由于散射介质的角度记忆效应存在于较小的角度范围内,因此成像视场有限,并且散射次数越多,角度记忆效应范围越小^[98]。研究者可以利用空间滤波技术选择低频成分,主要是弹道光 and 散射次数较少的光,扩大角度记忆效应的范围,从而扩大了散斑自相关成像的视场^[99]。与此同时,角度分辨光谱也可以作为角度记忆效应的测量手段,从实验上确定角度记忆效应的范围:定义图像相关性随入射角分布的曲线的最大值的 $1/e$ 处的全宽为角度记忆效应的范围^[98]。

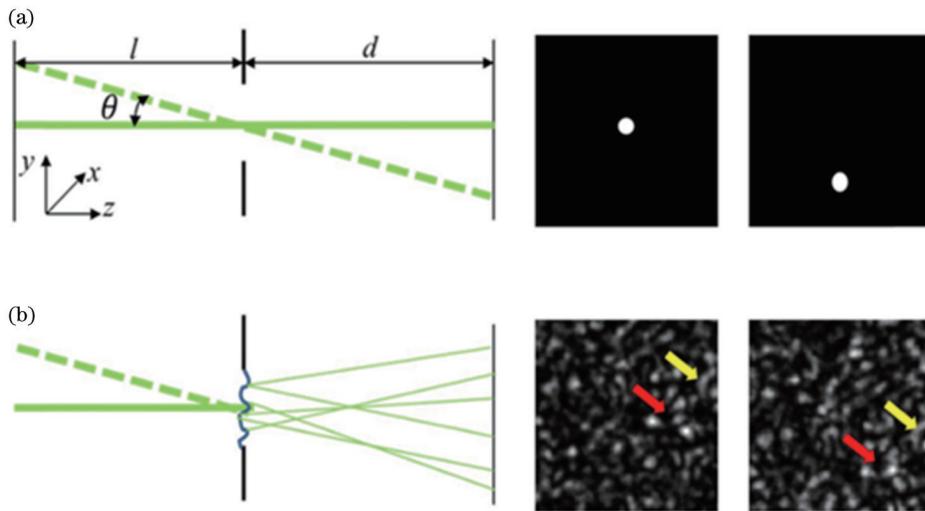


图 23 激光入射到(a)无厚度光阑和(b)随机相位掩模版的角度记忆效应示意图^[98]

Fig. 23 Schematic diagram of angular memory effects of laser incident on (a) thick-less diaphragm and (b) random phase mask^[98]

在相位显微技术领域中, Sung 等^[43]第一次通过实验实现了光学衍射层析成像,记录了多幅样品在不同入射角度下的图像,然后用这组变角度图像重建了活的生物细胞的三维图像,并提供了定量的三维折射率图。在此工作中,对于每个照明角度,二维测量的电场通过傅里叶变换被映射到三维散射势频域中的球面上,这个球面被称为 Ewald 球面。对于每个光照角度,

入射光的波矢发生变化,因此研究者可以用不同角度下的电场分布来映射目标函数的三维频谱的不同区域。完成映射后,对动量空间的相位函数进行傅里叶逆变换即可得到复折射率的三维分布。在其他显微散射成像技术的数据分析中,角度分辨光谱同样起着重要的作用。在多角度照明全内反射荧光成像中,通过将照明角度映射到倏逝激发波穿透深度,利用最小二

乘法,最小化图像中每一个像素对应的理论值和实验值的差异,获得定量的轴向轮廓,实现了较高的时间分辨率和轴向分辨率^[100]。

上述成像方式均被应用于微观物体的探测,宏观散射成像领域与微观散射成像不同的是,无法通过滤除散射光子以有效忽略散射介质的影响。因为在传播距离较小的散射区域探测弹道光子是可能的,但由于未散射光子数迅速趋近于 0,弹道成像对于传播距离更远或散射更强的介质变得不切实际^[101]。另外,前文中提到的散斑自相关成像技术依赖于记忆效应,记忆效应只适用于有限的角度视场,因此最适合于微观尺度^[102]。漫反射光学层析成像通过模拟光线从照明光源到放置在散射体周围的扩散层的散射来重建厚散射介质中的物体,工作时不需要提取弹道光子或利用光

的干涉,能够以厘米级分辨率捕获米级或更大尺度下被高度散射介质遮挡的物体^[103]。尽管如此,这种技术往往是侵入式的,需要接近散射介质的两侧,仅限于二维重建,或者需要计算耗时的迭代反演程序,并且通常重建质量有限^[104]。Lindell 等^[7]提出了一种通过散射介质进行非侵入式三维成像的技术:共聚焦扩散层析成像。如图 24 所示,在此系统中,由双轴振镜控制的一对角度扫描镜将激光从自由空间扫描到散射介质 32×32 的不同格点上,光穿过散射介质入射到隐藏物体上并再次散射回来,通过散射介质后被探测器从各方向接收。不同的格点对应于不同的入射角或接收角,接收到光信号后,他们利用与空间位置相关的扩散模型对初始捕获的三维测量体进行解卷积,利用频率波数偏移恢复隐藏对象。

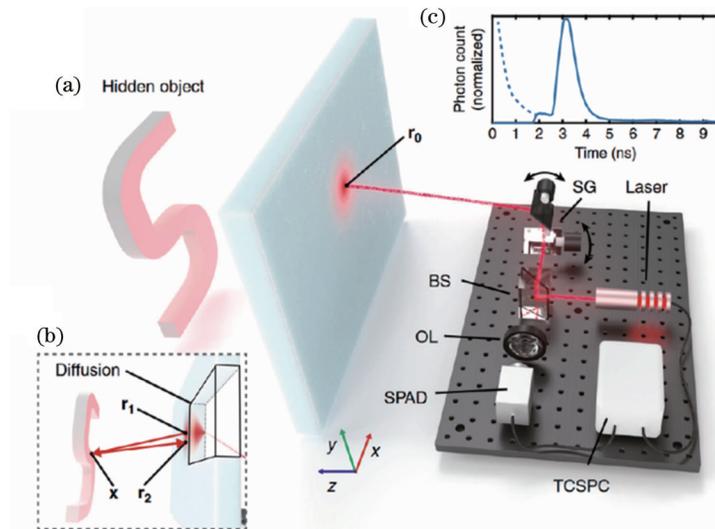


图 24 散射介质三维成像示意图。(a)脉冲激光和时间分辨单光子探测器对散射介质表面进行扫描;(b)光在介质中漫反射,被隐藏物反射,再通过介质漫反射回到探测器;(c)从隐藏物返回的光子随时间被探测器捕获^[7]

Fig. 24 Schematic diagram of three-dimensional imaging of scattered medium. (a) Pulsed laser and time-resolved single photon detector scan the surface of the scattering medium; (b) light is diffused in the medium, reflected by the concealment, and diffused back through the medium to the detector; (c) photons returned from the cache are captured by the detector over time^[7]

测量角度分辨光谱可以在光学特征尺寸测量中提高测量的准确度和灵敏度,从而准确地获得样品的轮廓参数和光学常数,这对于开发半导体工业中的缺陷检测和光学临界尺寸测量技术具有重要的意义,本文将在第 4 节详细介绍角度分辨光谱近年来在表征材料的轮廓和缺陷特征中的重要应用。同时,角度分辨光谱在光学散射成像中不仅起到了空间复合、空间滤波的重要作用,还可以作为图像重建过程中映射关系的一个集合存在,为新的成像系统设计方案和算法优化方案提供了有效工具,本文将在第 4 节详细介绍基于角度分辨光谱的散射成像在物理、生物、医学等领域的应用。

4 角度分辨光谱技术的应用

4.1 测量材料的光学常数

光学常数,包括折射率、消光系数、复介电常数和

光电导率等,是描述光电材料性质的数据基础,反映了光与物质的相互作用,解释了光在介质中的传播和耗散。光学常数的准确测定是材料和物理领域的研究基础,不仅有助于理解新奇的光电现象,揭示其背后的物理机制,而且可以为相关光电器件的优化设计提供方向^[105]。

通过角度分辨光谱的强度信息可以获取样品在不同光照角度与不同波长下的反射率和透射率,随后通过菲涅耳定律^[86]或 Kramers-Kronig 关系^[106]能够得到其折射率和消光系数,后一种方法的优点是可以扩展到入射光偏振难以控制的真空紫外区域^[87]。此外,利用反射偏振光角度分辨光谱中的相对振幅和相移,使用 Drude 方法,可以计算出材料的折射率、消光系数以及介电常数^[107],这种方法的优点是可以得到光学常数的显式表达式,但缺点是得到的结果非常敏感地依赖

于样品的制备手段^[108]。

在上述研究方法的基础上,研究者们利用角度分辨光谱测量出了不同材料的光学常数。金属良好的导电性使其在制造业中被广泛应用,Nestell等^[87]测量了金属薄膜的角度分辨光谱,通过计算机迭代反演反射率函数和透射率函数给出了所研究金属的折射率和消光系数。硅-二氧化硅材料是组成硅基器件和电路的最重要的部分之一,其光学性质得到了广泛的研究^[109]。然而,尽管硅是研究最多、理解最透彻的材料之一,但已报道的晶体硅光学常数谱的准确性仍然是一个问题。Herzinger等^[110]利用变入射角椭圆偏振光谱仪在 0.75~6.5 eV 范围内同时测定了硅和热生长二氧化硅的光学常数谱。石墨的单原子层石墨烯由于其显著的电子特性而备受关注,Kravets等^[111]在氧化的硅片上和无定形石英上对石墨烯进行了变角度的椭圆偏振光谱测量,并通过数值反演提取了光学常数。二氧化钒中的绝缘体到金属过渡可以实现各种光学应用,包括光学限制、光学谐振器调谐等,Wan等^[112]利用变角椭圆偏振光谱仪,对二氧化钒薄膜的不同波长下的折射率进行了测量,并使用标准材料表征技术和非椭圆偏振测量相结合对结果进行验证。

4.2 表征材料的轮廓和缺陷特征

半导体行业的发展以器件几何尺寸的不断缩小为标志,突破了计量设备量测能力的极限。量测能力是指测量数据需要足够的精度,典型的量测规则要求计量精度为被测特征尺寸的 1%^[51]。在 20 世纪 90 年代末,一种被称为散射测量的技术出现,它满足了高容量硅制造的测量需求。散射测量是一种基于晶圆制造过程中周期性特征产生的光散射分析的光学尺寸计量。由于散射测量具有快速、定量和无损的特点,在大批量光学特征尺寸的测量中,光学散射测量是 SEM 的一个有吸引力的替代品。另外,它与基于图像的测量技术不同,不受阿贝衍射极限的限制,因此在半导体工业具有亚波长特征尺寸的测量中发挥着重要作用。在半导体量测中,散射测量可以定义为对从周期性结构中衍射出来的光的测量和分析^[113]。利用角度分辨光谱测量的散射强度分布是反映光栅形状细节的光学指纹。对于一个周期性的器件,散射光由光栅方程确定的不同衍射级次组成,

$$d(\sin \theta_i \pm \sin \theta_n) = n\lambda, \quad (8)$$

式中: d 为光栅的周期; θ_i 和 θ_n 分别代表入射角和衍射角; n 为衍射级次; λ 为波长。尽管从式(8)确定衍射级次的物理位置很简单,但光与光栅之间的相互作用相当复杂,通常需要复杂而严格的计算来确定衍射级次的强度。除此之外,在实验中还要保证变角度测量模块的稳定性和准确性,因此对测量装置也有较高的要求。在光学散射测量的早期阶段,研究者主要通过机械转臂式散射计测量样品不同角度的反射率或透射率特征^[114]进而反演出样品的特征尺寸和轮廓特征。随

后,研究者使用穆勒矩阵椭圆偏仪对样品进行变角度测量,通过分析包含样品全部偏振态信息的穆勒矩阵反解出样品的轮廓参数^[8,39]。

在工业生产中,除产品的特征尺寸外,人们也关心样品上的缺陷分布情况^[119]。近年来,半导体行业开始大规模制造亚 10 nm 特征尺寸的光电元件^[120],光电元件的服役时间决定着半导体芯片的使用寿命,其良品率的检测和控制对制造成本的影响巨大,因此晶圆缺陷检测系统对晶圆厂商而言变得越来越重要^[121-122]。灵敏度是光学缺陷检测系统所能识别的缺陷的最小尺寸,被广泛用作该领域的主要评价指标^[123]。作为缺陷检测的其中一种方式,角度分辨光谱技术具有较高的检测灵敏度^[124]。Herffurth等^[115]将散射传感器测量结果与白光干涉测量结果进行直接比较,分析表面缺陷、表面粗糙度及相应的散射分布,二者测量得到的粗糙度谱相互吻合,此外,还建立了表面缺陷的散射模型,测量结果如图 25(a)所示。Chao等^[116]使用转臂式散射仪测量样品不同入射角和方位角的衍射效率,并与 SEM 图进行对比,确定缺陷的位置,最终分辨率低至每个采样区域的缺陷 <1%,测量结果如图 25(b)所示。Wang等^[117]将相干傅里叶散射测量法与轨道角动量光束结合,用于高灵敏度在线缺陷检测,探测到的缺陷尺寸为 $0.02\omega_0$,其中 ω_0 为高斯光束的束腰半径,测量结果如图 25(c)所示。Wang等^[118]使用穆勒矩阵散射场显微镜,利用计算重建算法定量确定有限深亚波长纳米结构的几何参数,如图 25(d)所示,测量结果以穆勒矩阵表示,此系统能够以低于 7 nm 的精度解析 $\lambda/16$ 的特征尺寸。

4.3 研究微纳光子材料的光学性质

近年来,研究者对微纳光子材料,如光子晶体、超材料、等离激元结构等的研究层出不穷^[125-130],为基础研究和应用研究提供了新思路。微纳光子材料可以在波长甚至亚波长尺度上调制光子的运动,提供了新的光调控手段。在微纳光子材料中,光子色散决定了材料对外部光场的响应,并在微纳光子材料中产生各种新奇的现象,例如:三维光子晶体中与角度相关的反射效应来源于其色散中的光子带隙^[131];在复色散带曲率的影响下,超材料中产生了负折射效应^[132]。因此,采集样品在动量空间的光子色散对于研究微纳光子材料有着重大意义。到目前为止,除前文介绍的动量空间成像系统以外,还存在其他方式可以实现动量分辨光谱的采集,并且通过这些系统进一步研究了微纳光子材料的性质。

Engelen等^[133]提出了相敏外差近场光学显微镜技术,通过近场探测系统、光纤马赫-曾德尔干涉仪和声光调制器等复杂的集成系统同时探测近场的强度和相位,研究了光脉冲通过光子晶体结构的传播,跟踪动量空间和时间中光子本征态的演化并揭示它们在飞秒时间尺度上的动态变化以及与其他本征态的耦合;Shi

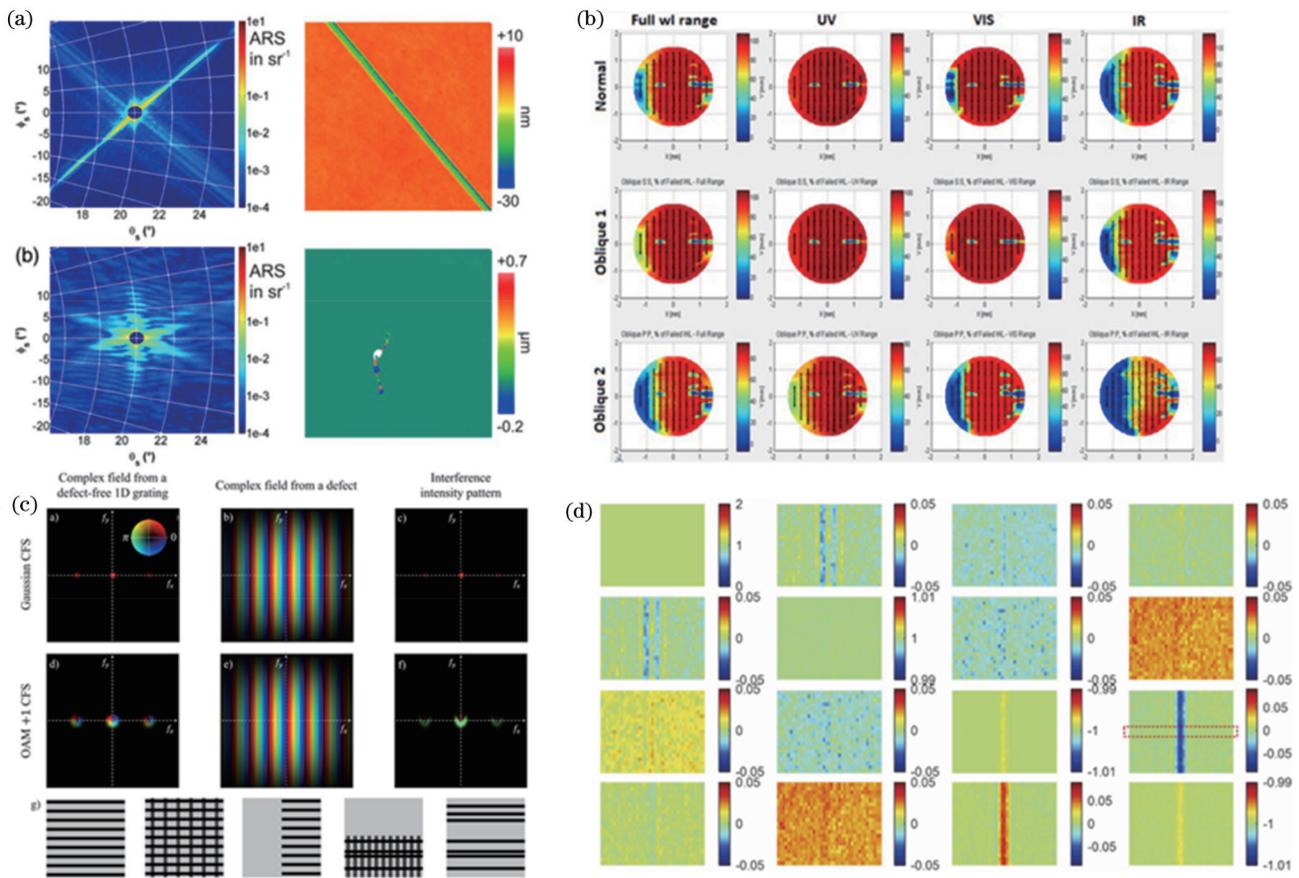


图 25 基于角度分辨光谱技术的缺陷测量结果图。(a) 散射传感器测量结果(左)与白光干涉测量结果(右)的比较^[115]; (b) 用于缺陷检测的无模型散射技术测量结果^[116]; (c) 一维线光栅结构在高速光束和轨道角动量光束照射下产生的远场衍射图样的特征, 包括仅振幅缺陷^[117]; (d) 标称宽度为 100 nm 的孤立硅线的正入射测量穆勒矩阵图像^[118]

Fig. 25 Image of defect measured results based on Angle resolution spectroscopy. (a) Comparison of measured results of scattering sensor and white light interferometry^[115]; (b) measured results of model-free scattering technique for defect detection^[116]; (c) characteristics of far-field diffraction pattern generated by one-dimensional line grating structure under the irradiation of Gaussian beam and orbital angular momentum beam, including amplitude defects only^[117]; (d) normal incidence measured Muller matrix image of isolated silicon wire with nominal width of 100 nm^[118]

等^[134]通过变角度光谱技术表征和模拟了金属平面上的单层乳胶球阵列; Osorio 等^[135]通过光学傅里叶变换法, 利用光学透镜进行光学傅里叶变换来获得动量空间信息, 表征了金属薄膜中的等离子体靶心天线的角度依赖极化分辨散射; Genco 等^[136]使用双折射共路干涉仪对介电纳米盘超构表面进行了表征, 展示了其偶极模式的角度分辨光谱; Chu 等^[137]测量了不同可食用结构色样品的角度分辨反射和散射光谱, 用于表征结构色样品的显色性能。

4.4 光学散射成像

散射是一个物理过程, 限制着所有光学成像系统的成像性能。例如, 激光雷达(LiDAR)系统对于汽车、水下和空中飞行器的感知和探测与其周围的三维环境至关重要^[138]。然而, 目前的LiDAR系统在云、雾、尘埃、雨水等引起散射的不利条件下失效, 这种限制是三维感知和导航系统的关键障碍, 阻碍了系统的稳健和安全运行。类似的挑战也出现在与遥感或天文学相关的其他宏观应用中, 其中大气散射层阻碍了测

量捕获。在微观应用中, 如生物医学成像和神经成像^[139], 生物组织的散射使进入大脑的成像复杂化, 是高分辨率活体成像的障碍^[140]。在这些应用中, 通过强散射介质进行稳定、高效地成像是一个挑战, 因为它通常要求解一个复杂的逆问题。

除了提高散射成像的质量, 角度分辨光谱在散射成像中的另一个重要应用为: 增大系统的数值孔径, 提高图像的分辨率。Goodman 等^[40]提出了综合孔径傅里叶全息术。在综合孔径傅里叶全息术中, 研究者改变相干光的照明角度, 全息记录每一个角度下测量到的傅里叶平面上的复振幅, 将得到的傅里叶谱结合起来, 以得到综合的傅里叶谱, 使得该谱宽度超过用轴上单一照明记录的频谱宽度, 从而提高分辨率。在此基础上, Fienup 等^[141]用二维孔径合成技术将数字全息成像扩展到十亿像素级。此外, 还有一种替代方式, 称为傅里叶层叠法^[142], 其成像过程如图 26 所示, 研究者使用一个点光源阵列, 产生不同角度上的平面波二维集合, 再按顺序用这些平面波照明物体, 利用

探测到的低分辨率成像的强度分布和相应的有限傅里叶谱,复原相互重叠的区域并把它们衔接起来,就

可以覆盖更宽广的傅里叶空间并得到高分辨率图像。

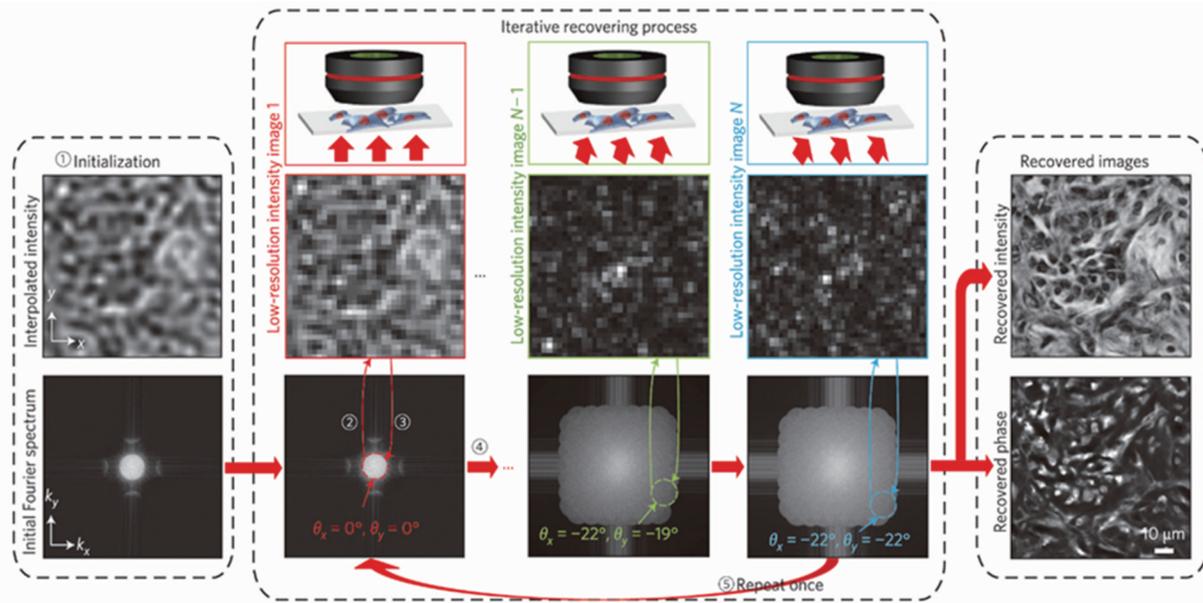


图 26 变角度捕获的多张低分辨率强度图像,恢复成 1 张高分辨率强度图像和 1 张高分辨率相位图的过程^[142]

Fig. 26 Process of restoring multiple low-resolution intensity images captured at variable angles to one high-resolution intensity image and one high-resolution phase image^[142]

4.5 其他应用

角度分辨光谱技术的应用领域较广泛,除 4.1~4.4 节介绍的应用以外,角度分辨光谱技术还可以探测物质的双向反射率分布函数(BRDF)^[143]和双向透射率分布函数(BTDF)^[144],进而量化物体的角度分辨散射特性。BRDF 或 BTDF 表示当光入射到样品面上某一点时,出射光的强度随波长、入射光天顶角和方位角、出射光天顶角和方位角的分布函数,它能够有效表征材料的反射或透射特性^[145],广泛应用于计算机建模、遥感、航空航天、生物医学等领域。如:Jia 等^[146]提出了一种校正崎岖地形上森林地区航空高光谱图像 BRDF 效应的方法;Bieron 等^[147]针对各向同性的 BRDF,提出了一种新的图像驱动拟合策略;Lucht 等^[45]基于空间的多角度测量,在可见光波段获得了标称空间分辨率为 1 km 的太阳天顶角依赖的地表反照率图;Inoue 等^[148]应用抛物面反射原理,使用测角光度计测量了曲面双向反射分布函数。由于细胞中的散射光特性对细胞核等亚细胞散射体的大小、分布和相对折射率非常敏感,也有研究者使用角度分辨光谱技术测量样品的 BRDF,研究细胞和亚细胞结构:Ceolato 等^[149]使用基于相干白光超连续谱激光器的高光谱偏振和角散射测量提供了多细胞肿瘤球的完整光学特征。

除上述应用以外:庞思敏等^[150]提出,利用角度分辨光谱可以更加简便地获得材料的各个弹性常数,结合沿任意方向传播的声学声子的声速计算公式可更快地求解材料中沿任意方向的声速及相应方向的晶格

热导率;Lin 等^[6]提出了一种利用菲涅耳定律,通过沿黑磷主轴方向的角分辨反射率确定真实拉曼张量和复折射率的方法。

5 结束语

角度分辨光谱技术是一种研究光与物质相互作用的技术。本文综述了角度分辨光谱的生成方法、数据处理技术及其在各领域中的应用。目前,生物医学、材料科学和微纳光子学等领域已经发展出了高分辨率和大视场的角度分辨光谱测量技术,可以对微观和宏观样品进行表征。此外,还发展出了高效和准确的理论模型和智能算法,用于从角度分辨光谱中提取光学信息。

虽然这项技术已经取得了很大的进展,但仍然面临一些技术挑战和待解决的问题。首先,角度分辨光谱的生成方法需要更高的精度和效率。目前的实现方式包括机械运动式变角度测量法和傅里叶平面成像法,但仍有改进的空间。解决这一挑战的方案包括改进机械系统的精度、优化光学系统的设计,并结合先进的信号处理和数据分析算法,以提高角度分辨光谱的生成效率和准确度。其次,角度分辨光谱数据的分析和解释需要更强的理论支持和高效的算法。面对复杂的光学逆散射问题和非线性特性,传统的分析方法和算法可能无法满足需求。因此,进一步发展理论模型和提出新的算法是解决方案之一。例如,结合机器学习和人工智能技术,开发适用于角度分辨光谱数据处理的深度学习算法,可以提高数据分析的准确性和效

率。此外,角度分辨光谱技术的应用领域还有待扩展和深化。尽管角度分辨光谱已经在物理学、天文学和生物医学等领域得到广泛应用,但仍有许多领域可以探索。例如,在微纳光子学领域,通过角度分辨光谱技术可以研究光子晶体、超构表面和纳米材料等微纳结构的特性,进一步了解它们的光子学性质和光场调控能力,为微纳光子学器件和光学材料的设计与应用提供基础支持。在生物医学光学成像中,角度分辨光谱技术可以用于非侵入性的光学显微镜成像,帮助观察和分析细胞和组织的形貌结构,检测疾病变化并进行早期诊断。

总之,角度分辨光谱技术在光学测量领域具有重要的地位和广阔的应用前景。面临的挑战包括提高生成方法的精度和效率,深化数据分析的理论支持和算法开发,以及拓展应用领域的广度和深度。通过持续的研究和创新,相信可以克服这些挑战,推动角度分辨光谱技术的进一步发展和应用。

参 考 文 献

- [1] Mohammed A, Abdullah A. Scanning electron microscopy (SEM): a review[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania. 2018, 2018: 7-9.
- [2] Custance O, Perez R, Morita S. Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(12): 803-810.
- [3] Jonsson J C, Smith G B, Deller C, et al. Directional and angle-resolved optical scattering of high-performance translucent polymer sheets for energy-efficient lighting and skylights[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(14): 2745-2753.
- [4] Patrick H J, Germer T A, Cresswell M W, et al. Extraction of trench geometry and linewidth of nanoscale grating targets in (110)-oriented silicon using angle-resolved scatterometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7042: 70420B.
- [5] Schröder S, Herffurth T, Blaschke H, et al. Angle-resolved scattering: an effective method for characterizing thin-film coatings[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C164-C171.
- [6] Lin M L, Leng Y C, Cong X, et al. Understanding angle-resolved polarized Raman scattering from black phosphorus at normal and oblique laser incidences[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(22): 1894-1900.
- [7] Lindell D B, Wetzstein G. Three-dimensional imaging through scattering media based on confocal diffuse tomography[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4517.
- [8] Tan Y Y, Chen C, Chen X G, et al. Development of a tomographic Mueller-matrix scatterometer for nanostructure metrology[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(7): 073702.
- [9] Zhao M X, Chen M K, Zhuang Z P, et al. Phase characterisation of metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 52.
- [10] Zhang Y W, Chen A, Liu W Z, et al. Observation of polarization vortices in momentum space[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(18): 186103.
- [11] Pyhtila J W, Wax A. Rapid, depth-resolved light scattering measurements using Fourier domain, angle-resolved low coherence interferometry[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6178-6183.
- [12] Jung J, Kim W, Kim J, et al. Multi spectral holographic ellipsometry for a complex 3D nanostructure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46956-46971.
- [13] Zhang Y W, Zhao M X, Wang J J, et al. Momentum-space imaging spectroscopy for the study of nanophotonic materials[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(8): 824-838.
- [14] Chen X G, Zhang C W, Liu S Y, et al. Mueller matrix ellipsometric detection of profile asymmetry in nanoimprinted grating structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(19): 194305.
- [15] Podoleanu A G. Optical coherence tomography[J]. *Journal of Microscopy*, 2012, 247(3): 209-219.
- [16] Weng W Q, Chi J J, Wang X C, et al. Ellipsoidal porous patch with anisotropic cell inducing ability for inhibiting skin scar formation[J]. *Engineered Regeneration*, 2022, 3(3): 262-269.
- [17] Wang J J, Zhao M X, Liu W Z, et al. Shifting beams at normal incidence via controlling momentum-space geometric phases[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6046.
- [18] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [19] Reddy J N. Introduction to the finite element method[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [20] Schneider J B. Understanding the finite-difference time-domain method[D]. Pullman: School of Electrical Engineering and Computer Science Washington State University, 2010: 28.
- [21] Matsushima K, Shimobaba T. Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19662-19673.
- [22] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, et al. Improved measurement accuracy in optical scatterometry using correction-based library search[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6726-6734.
- [23] Stein S E, Scott D R. Optimization and testing of mass spectral library search algorithms for compound identification[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 1994, 5(9): 859-866.
- [24] Dixit D J, O'Mullane S, Sunkoju S, et al. Sensitivity analysis and line edge roughness determination of 28-nm pitch silicon fins using Mueller matrix spectroscopic ellipsometry-based optical critical dimension metrology[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(3): 031208.
- [25] Zhu J L, Liu S Y, Chen X G, et al. Robust solution to the inverse problem in optical scatterometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22031-22042.
- [26] Fan Z X, Qian C, Jia Y T, et al. Homeostatic neuro-metasurfaces for dynamic wireless channel management[J]. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabn7905.
- [27] Li T Y, Chen A, Fan L J, et al. Photonic-dispersion neural networks for inverse scattering problems[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 154.
- [28] Liu J M, Sun Y, Eldeniz C, et al. RARE: image reconstruction using deep priors learned without groundtruth[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2020, 14(6): 1088-1099.
- [29] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338-341.
- [30] Yoo J, Sabir S, Heo D, et al. Deep learning diffuse optical tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2020, 39(4): 877-887.
- [31] Yu W H, Li X A, Wang B, et al. Optical diffraction tomography of second-order nonlinear structures in weak scattering media: theoretical analysis and experimental consideration[J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 45724-45737.
- [32] Shimizu Y, Chen L C, Kim D W, et al. An insight into optical metrology in manufacturing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 042003.
- [33] Bergmann R B, Kalms M, Falldorf C. Optical In-process

- measurement: concepts for precise, fast and robust optical metrology for complex measurement situations[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22): 10533.
- [34] Gatebe C K, King M D. Airborne spectral BRDF of various surface types (ocean, vegetation, snow, desert, wetlands, cloud decks, smoke layers) for remote sensing applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 131-148.
- [35] Jiao Z T, Schaaf C B, Dong Y D, et al. A method for improving hotspot directional signatures in BRDF models used for MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 135-151.
- [36] Song Q H, Liu X S, Qiu C W, et al. Vectorial metasurface holography[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(1): 011311.
- [37] Deng J A, Deng L G, Zhou Z, et al. Single-sized multifunctional metasurfaces for simultaneous nanoprinting and holography inspired by tri-redundancy[J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29161-29172.
- [38] Gong L, Lin S L, Huang Z W. Stimulated Raman scattering tomography enables label-free volumetric deep tissue imaging[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2100069.
- [39] Novikova T, De Martino A, Bulkin P, et al. Metrology of replicated diffractive optics with Mueller polarimetry in conical diffraction[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2033-2046.
- [40] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co. Publishers, 2005.
- [41] Che Z Y, Zhang Y B, Liu W Z, et al. Polarization singularities of photonic quasicrystals in momentum space[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(4): 043901.
- [42] Iftimia N, Bouma B E, Tearney G J. Speckle reduction in optical coherence tomography by "path length encoded" angular compounding[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8(2): 260-263.
- [43] Sung Y, Choi W, Fang-Yen C, et al. Optical diffraction tomography for high resolution live cell imaging[J]. *Optics Express*, 2009, 17(1): 266-277.
- [44] Zheng C, Zhao G Y, Liu W J, et al. Three-dimensional super-resolved live cell imaging through polarized multi-angle TIRF[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1423-1426.
- [45] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 977-998.
- [46] Maria J, Aas L M S, Kildemo M. In and out of incidence plane Mueller matrix scattering ellipsometry of rough mc-Si[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 571: 399-404.
- [47] Chen C, Chen X G, Shi Y T, et al. Metrology of nanostructures by tomographic Mueller-matrix scatterometry[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2583.
- [48] Kumar N, Petrik P, Ramanandan G K P, et al. Reconstruction of sub-wavelength features and nano-positioning of gratings using coherent Fourier scatterometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24678-24688.
- [49] Shyu D M, Ku Y S, Hsu W T. Angle-resolved scatterfield microscope for linewidth measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7272: 72721L.
- [50] Jošt M, Krč J, Topič M. Camera-based angular resolved spectroscopy system for spatial measurements of scattered light[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4795-4803.
- [51] Raymond C. Overview of scatterometry applications in high volume silicon manufacturing[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 788(1): 394-402.
- [52] Kajfez D. *Q-factor*[M]//*Encyclopedia of RF and microwave engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [53] Hsu C W, Zhen B, Lee J, et al. Observation of trapped light within the radiation continuum[J]. *Nature*, 2013, 499(7457): 188-191.
- [54] Fan S H, Joannopoulos J D. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(23): 235112.
- [55] Zhen B, Hsu C W, Igarashi Y, et al. Spawning rings of exceptional points out of Dirac cones[J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 354-358.
- [56] Fan S H, Suh W, Joannopoulos J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2003, 20(3): 569-572.
- [57] Jin J C, Yin X F, Ni L F, et al. Topologically enabled ultrahigh-Q guided resonances robust to out-of-plane scattering[J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 501-504.
- [58] Fujiwara H. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [59] Gil J J, Bernabeu E. A depolarization criterion in Mueller matrices[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1985, 32(3): 259-261.
- [60] Hatit S B, Foldyna M, De Martino A, et al. Angle-resolved Mueller polarimeter using a microscope objective[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2008, 205(4): 743-747.
- [61] Sannomiya T, Balmer T E, Hafner C, et al. Optical sensing and determination of complex reflection coefficients of plasmonic structures using transmission interferometric plasmonic sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(5): 053102.
- [62] Bliokh K Y. Geometrical optics of beams with vortices: berry phase and orbital angular momentum Hall effect[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(4): 043901.
- [63] Xiao D, Chang M C, Niu Q. Berry phase effects on electronic properties[J]. *Reviews of modern physics*, 2010, 82(3): 1959.
- [64] Busch P, Heinonen T, Lahti P. Heisenberg's uncertainty principle[J]. *Physics Reports*, 2007, 452(6): 155-176.
- [65] Carlon Zambon N, St-Jean P, Miličević M, et al. Optically controlling the emission chirality of microlasers[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 283-288.
- [66] Wang B, Liu W Z, Zhao M X, et al. Generating optical vortex beams by momentum-space polarization vortices centred at bound states in the continuum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(10): 623-628.
- [67] Liu P S, Lü B D. The vectorial angular-spectrum representation and Rayleigh-Sommerfeld diffraction formulae[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(4): 741-744.
- [68] Ulanowski Z, Wang Z N, Kaye P H, et al. Application of neural networks to the inverse light scattering problem for spheres[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 4027-4033.
- [69] Ferreras Paz V, Peterhänsel S, Frenner K, et al. Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(11): e36.
- [70] Björck Å. Least squares methods[J]. *Handbook of Numerical Analysis*, 1990, 1: 465-652.
- [71] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//Watson G A. *Numerical analysis. Lecture notes in mathematics*. Heidelberg: Springer, 2006, 630: 105-116.
- [72] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [73] Albawi S, Mohammed T A, Al-Zawi S. Understanding of a convolutional neural network[C]//2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), August 21-23, 2017, Antalya, Turkey. New York: IEEE Press, 2018.
- [74] Zagoruyko S, Komodakis N. Wide residual networks[EB/OL]. (2016-05-23)[2023-02-03]. <https://arxiv.org/abs/1605.07146>.
- [75] Kim I, Bae Y, Gwak S, et al. Machine learning aided profile measurement in high-aspect-ratio nanostructures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11783: 117830K.
- [76] Monakhova K, Yanny K, Aggarwal N, et al. Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array[J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1298-1307.

- [77] Yee K S, Chen J S. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(3): 354-363.
- [78] Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [79] Liu S Y, Chen X G, Zhang C W. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 584: 176-185.
- [80] Collins R W, Koh J. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer: instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(8): 1997-2006.
- [81] Cousins A K, Gottschalk S C. Application of the impedance formalism to diffraction gratings with multiple coating layers[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4268-4271.
- [82] Azzam R M A, Bashara N M, Ballard S S. Ellipsometry and polarized light[J]. *Physics Today*, 1978, 31(11): 72.
- [83] Novikova T, De Martino A, Hatit S B, et al. Application of Mueller polarimetry in conical diffraction for critical dimension measurements in microelectronics[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3688-3697.
- [84] Weidner A, Slodowski M, Halm C, et al. Effective-medium model for fast evaluation of scatterometric measurements on gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5375: 232-243.
- [85] Woollam J A, Johs B D, Herzinger C M, et al. Overview of variable-angle spectroscopic ellipsometry (VASE): I. Basic theory and typical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 10294: 1029402.
- [86] Hecht E. *Optics*[M]. New York: Pearson Education India, 2012: 223-257.
- [87] Nestell J E, Christy R W. Derivation of optical constants of metals from thin-film measurements at oblique incidence[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 643-651.
- [88] Snyder P G, Rost M C, Bu-Abbud G H, et al. Variable angle of incidence spectroscopic ellipsometry: application to GaAs-Al_xGa_{1-x}As multiple heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(9): 3293-3302.
- [89] Huang H T, Kong W, Terry F L, Jr. Normal-incidence spectroscopic ellipsometry for critical dimension monitoring[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(25): 3983-3985.
- [90] Goldstein D H. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6676-6683.
- [91] Hounsfield G N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system[J]. *The British Journal of Radiology*, 1973, 46(552): 1016-1022.
- [92] Kalender W A. X-ray computed tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51(13): R29-R43.
- [93] Schmitt J M, Xiang S H, Yung K M. Speckle in optical coherence tomography[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 1999, 4(1): 95-105.
- [94] Schmitt J M. Array detection for speckle reduction in optical coherence microscopy[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1997, 42(7): 1427-1439.
- [95] Bashkansky M, Reintjes J. Statistics and reduction of speckle in optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 545-547.
- [96] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [97] Feng S C, Kane C, Lee P A, et al. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(7): 834-837.
- [98] Liu H L, Liu Z T, Chen M J, et al. Physical picture of the optical memory effect[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(11): 1323-1330.
- [99] Chen M J, Liu H L, Liu Z T, et al. Expansion of the FOV in speckle autocorrelation imaging by spatial filtering[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5997-6000.
- [100] Jin L H, Wu J, Xiu P, et al. High-resolution 3D reconstruction of microtubule structures by quantitative multi-angle total internal reflection fluorescence microscopy[J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 16-23.
- [101] Kang S, Jeong S, Choi W, et al. Imaging deep within a scattering medium using collective accumulation of single-scattered waves[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 253-258.
- [102] Zhu S, Guo E L, Gu J E, et al. Imaging through unknown scattering media based on physics-informed learning[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): B210-B219.
- [103] Gibson A, Dehghani H. Diffuse optical imaging[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, 367(1900): 3055-3072.
- [104] Hoshi M D Y, Yamada Y. Overview of diffuse optical tomography and its clinical applications[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(9): 091312.
- [105] Seraphin B O, Bennett H E. *Optical constants*[M]// *Semiconductors and semimetals*. Amsterdam: Elsevier, 1967, 3: 499-543.
- [106] Robinson T S. Optical constants by reflection[J]. *Proceedings of the Physical Society Section B*, 1952, 65(11): 910-911.
- [107] Steel M R. *Optical properties and electronic structure of metals and alloys*[D]. Edinburgh, : Heriot-Watt University, 1972.
- [108] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [109] Nguyen N V, Chandler-Horowitz D, Amirtharaj P M, et al. Spectroscopic ellipsometry determination of the properties of the thin underlying strained Si layer and the roughness at SiO₂/Si interface[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(20): 2688-2690.
- [110] Herzinger C M, Johs B, McGahan W A, et al. Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(6): 3323-3336.
- [111] Kravets V G, Grigorenko A N, Nair R R, et al. Spectroscopic ellipsometry of graphene and an exciton-shifted van Hove peak in absorption[J]. *Physical Review B*, 2010, 81(15): 155413.
- [112] Wan C H, Zhang Z, Woolf D, et al. On the optical properties of thin-film vanadium dioxide from the visible to the far infrared[J]. *Annalen Der Physik*, 2019, 531(10): 1900188.
- [113] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(10): 532-547.
- [114] Raymond C J. *Scatterometry for semiconductor metrology*[M]// Diebold A C. *Handbook of silicon semiconductor metrology*. Boston: CRC Press, 2001: 389-418.
- [115] Herfurth T, Schröder S, Trost M, et al. Comprehensive nanostructure and defect analysis using a simple 3D light-scatter sensor[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3279-3287.
- [116] Chao R, Liu C C, Bozdog C, et al. Scatterometry-based defect detection for DSA in-line process control[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9424: 942419.
- [117] Wang B, Tanksalvala M, Zhang Z, et al. Coherent Fourier scatterometry using orbital angular momentum beams for defect detection[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3342-3358.
- [118] Wang C, Chen X G, Chen C, et al. Reconstruction of finite deep sub-wavelength nanostructures by Mueller-matrix scattered-field microscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32158-32168.
- [119] Shankar N G, Zhong Z W. Defect detection on semiconductor wafer surfaces[J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 77(3/4): 337-346.
- [120] Schuegraf K, Abraham M C, Brand A, et al. Semiconductor logic technology innovation to achieve sub-10 nm manufacturing

- [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2013, 1(3): 66-75.
- [121] 刘佳敏, 赵杭, 吴启哲, 等. 先进节点图案化晶圆缺陷检测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312003.
Liu J M, Zhao H, Wu Q Z, et al. Patterned wafer defect inspection at advanced technology nodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312003.
- [122] Zhou Z D, Luo H Y, Xiong W, et al. Spot-scanning laser scattering system for defects detection of wafer surface[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12478: 124782D.
- [123] Zhu J L, Liu J M, Xu T L, et al. Optical wafer defect inspection at the 10 nm technology node and beyond[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(3): 032001.
- [124] Joo J Y, Lee J H, Jang W H, et al. Defect height estimation via model-less TSOM under optical resolution[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27508-27520.
- [125] Nair R V, Vijaya R. Photonic crystal sensors: an overview[J]. Progress in Quantum Electronics, 2010, 34(3): 89-134.
- [126] Fang Z Y, Thongrattanasiri S, Schlather A, et al. Gated tunability and hybridization of localized plasmons in nanostructured graphene[J]. ACS Nano, 2013, 7(3): 2388-2395.
- [127] Feng L, Xu Y L, Fegadolli W S, et al. Experimental demonstration of a unidirectional reflectionless parity-time metamaterial at optical frequencies[J]. Nature Materials, 2013, 12(2): 108-113.
- [128] Miri M A, Alù A. Exceptional points in optics and photonics[J]. Science, 2019, 363(6422): eaar7709.
- [129] Shen H T, Zhen B, Fu L A. Topological band theory for non-Hermitian Hamiltonians[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(14): 146402.
- [130] Krasnok A, Baranov D, Li H N, et al. Anomalies in light scattering[J]. Advances in Optics and Photonics, 2019, 11(4): 892-951.
- [131] Noda S, Tomoda K, Yamamoto N, et al. Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths[J]. Science, 2000, 289(5479): 604-606.
- [132] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [133] Engelen R J P, Sugimoto Y, Gersen H, et al. Ultrafast evolution of photonic eigenstates in k-space[J]. Nature Physics, 2007, 3(6): 401-405.
- [134] Shi L, Liu X H, Yin H W, et al. Optical response of a flat metallic surface coated with a monolayer array of latex spheres [J]. Physics Letters A, 2010, 374(8): 1059-1062.
- [135] Osorio C I, Mohtashami A, Koenderink A F. K-space polarimetry of bullseye plasmon antennas[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9966.
- [136] Genco A, Cruciano C, Corti M, et al. K-space hyperspectral imaging by a birefringent common-path interferometer[J]. ACS Photonics, 2022, 9(11): 3563-3572.
- [137] Chu J, Chen Y, Tan S Y, et al. Edible amorphous structural color[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(4): 2102125.
- [138] Liu X Y. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2008, 32(1): 31-49.
- [139] Ntziachristos V. Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology[J]. Nature Methods, 2010, 7(8): 603-614.
- [140] Eggebrecht A T, Ferradal S L, Robichaux-Viehoever A, et al. Mapping distributed brain function and networks with diffuse optical tomography[J]. Nature Photonics, 2014, 8(6): 448-454.
- [141] Fienup J R, Tippie A E. Gigapixel synthetic-aperture digital holography[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8122: 812203.
- [142] Zheng G A, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(9): 739-745.
- [143] Montes R, Urena C. An overview of BRDF models: technical report LSI-2012-001[R]. Grenada: University of Grenada, 2012.
- [144] Bartell F O, Dereniak E L, Wolfe W L. The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function (brdf) and bidirectional transmittance distribution function (BTDF)[J]. Proceedings of SPIE, 1981, 0257: 154-160.
- [145] Hou Q Y, Wang Z L, Su J Y, et al. Measurement of equivalent BRDF on the surface of solar panel with periodic structure[J]. Coatings, 2019, 9(3): 193.
- [146] Jia W, Pang Y, Tortini R, et al. A kernel-driven BRDF approach to correct airborne hyperspectral imagery over forested areas with rugged topography[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 432.
- [147] Bieron J, Peers P. An adaptive BRDF fitting metric[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(4): 59-74.
- [148] Inoue S, Igarashi Y, Hoshi T, et al. Measuring BRDF for curved surfaces based on parabolic reflection[J]. Optics Continuum, 2022, 1(8): 1637-1651.
- [149] Ceolato R, Riviere N, Jorand R, et al. Light-scattering by aggregates of tumor cells: spectral, polarimetric, and angular measurements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 146: 207-213.
- [150] 庞思敏, 谢亚茹, 张俊. 角分辨布里渊光散射对材料的弹性和热学性能研究的综述[J]. 光散射学报, 2021, 33(2): 101-111.
Pang S M, Xie Y R, Zhang J. Review of investigating the elastic and thermal properties by angle-resolved Brillouin light scattering[J]. The Journal of Light Scattering, 2021, 33(2): 101-111.

Angle-Resolved Spectroscopy and Its Applications

Zhao Jingyi^{1,2,3,4}, Zhao Maoxiong^{1,2,3,4*}, Shi Lei^{1,2,3,4**}, Zi Jian^{1,2}

¹State Key Laboratory of Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²Key Laboratory of Micro- and Nano-Photonic Structures, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China;

³Shanghai Engineering Research Center of Optical Metrology for Nano-Fabrication, Shanghai 200433, China;

⁴Fudan University-Enterprise Joint Research Center for Optic Detection and Optic Integration, Shanghai 200433, China

Abstract

Significance Optical scattering provides researchers with a wealth of information, including light intensity, phase, and polarization. Angle-resolved spectroscopy (ARS) is a powerful technique that measures the distribution of light intensity with angles or wavelengths. It plays a crucial role in obtaining important optical information to solve optical inverse problems and represent the properties of micro-nanophotonic materials.

In optical inverse problems, ARS assists researchers in determining the morphological structures and optical constants of materials by analyzing the angle-dependent behaviors of scattered light. This technique is particularly helpful when traditional measurement methods, such as scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM), are not feasible. By solving optical inverse problems using ARS and inverse algorithms, researchers can gain a deeper understanding of the behavior of light in complex materials and systems. Additionally, it finds wide application in the semiconductor industry to detect defects in wafers and measure optical critical dimensions of optoelectronic components.

ARS also enables researchers to represent the properties of micro-nanophotonic materials. It plays a crucial role in photonic crystal and metamaterial research. By measuring the angular dependence of light scattered or emitted by these materials, researchers can gain insights into their unique optical properties, such as band structure, dispersion, capabilities of light field regulation, and photonic density of states. This information is essential for designing and optimizing these materials for various applications, such as sensing, imaging, and light manipulation. Furthermore, the ability to control and manipulate light at the nanoscale has the potential to revolutionize photonics and enable the development of new technologies. Therefore, ARS is a powerful technique for investigating optical inverse problems and harnessing the optical properties of micro-nanophotonic materials.

In recent years, various methods have emerged for generating angle-resolved spectra and processing data. Mechanical angle-scanning spectroscopy measurement and Fourier planar imaging represent the two primary methods employed. Urgent application needs have spurred the rapid proposal of abundant data analysis algorithms. However, it is important to acknowledge that each approach possesses its limitations and drawbacks. Therefore, the provision of a rational framework is imperative to summarize these methods and applications, guiding future advancements in the field.

Progress In terms of generating angle-resolved spectra, two main methods will be introduced. The first method is mechanical angle-scanning spectroscopy measurement. Jérôme *et al.* developed the Mueller matrix scattering ellipsometry (MMSE), which enables scanning both inside and outside the incident plane (Fig. 2). Heather *et al.* employed the goniometric optical scatter instrument (GOSI) to obtain angle-resolved reflection for s and p polarizations of the target (Fig. 3). Chen *et al.* developed the tomographic Mueller-matrix scatterometer (TMS), where the incident beam is focused on the rear focal plane of the objective lens, and the angle of the incident light is changed by rotating the mirror (Fig. 4). Zhao *et al.* designed an interferometric imaging phase measurement system that allows for changes in the angle of reference light by moving the lens perpendicular to the optical axis (Fig. 5). The mechanical angle-scanning spectra measurement method correlates the incident and exit angles of the sample with the motor step size or the position of the optical element, offering greater intuitiveness and flexibility. However, it requires higher precision in the motor or translation stage, and mechanical vibrations can decrease system stability.

The second method for generating angle-resolved spectra is Fourier planar imaging. Zhang *et al.* proposed momentum-space imaging spectroscopy (MSIS), consisting of a momentum-space imaging module, spectral imaging detection module, and phase resolution measurement module (Fig. 7). Fourier planar imaging allows researchers to obtain optical signals corresponding to the exit angles of all samples simultaneously without the need for mechanical movement. This approach provides a more stable system. However, it necessitates higher optical path requirements and is significantly influenced by lens aberrations and numerical aperture.

Next, several data analysis algorithms will be introduced for momentum-space imaging and optical inverse problems. In momentum-space imaging, time-domain coupled mode theory (TCMT) is employed to extract photonic eigenstates from experimental spectra. Additionally, the angular spectral method (ASM) is used to study the optical field regulation capability of micro- and nano structures. In optical inverse scattering problems, researchers adopt a reverse thinking approach to map the data space, which includes the spectra, to the parameter space where specific features of the scattering target reside. Rigorous coupled wave analysis (RCWA), finite element method (FEM), and finite-difference time-domain (FDTD) are utilized in rigorous simulations to obtain theoretical data. Various methods can be employed to solve optical inverse scattering problems, including library search algorithms, the least square method, and neural network algorithms. In optical scattering imaging, more complex nonlinear fractions are required for target image reconstruction, such as optical cone transformation and inversion of Lippmann-Schwinger integral equations using deep neural networks. It is also necessary to incorporate spatial filtering and spatial compound algorithms to reduce noise and enhance imaging quality.

Finally, numerous applications of ARS will be discussed. These applications encompass measuring the optical constants of materials, characterizing material profiles and defects, studying the optical properties of micro- and nano photonic materials, as well as scattering imaging and other relevant areas. However, it is important to acknowledge that this technique also has certain drawbacks. One notable limitation is the cost and complexity associated with instruments and techniques required for achieving high-precision angle measurements. The implementation of ARS often necessitates specialized hardware and software, which can be expensive and challenging to deploy in certain settings. Additionally, environmental factors such as temperature and vibration can impact angle measurement accuracy, making it difficult to obtain reliable results in some applications.

Conclusions and Prospects ARS is a versatile and powerful technique with applications in optics, biomedicine, materials science, and imaging. It provides valuable insights into light behavior and enables the development of tailored materials for practical applications. Despite limitations, ARS continues to be an area of great interest and research in various fields. With ongoing development and refinement, this technology holds the potential to unlock new findings and enhance our understanding of complex materials.

Key words angle-resolved spectrum; optical inverse scattering problems; optical scattering imaging; optical critical dimension; defect detection