

SUB-WAVELENGTH ELECTROMAGNETICS

Vol 1

亚波长电磁学 (上册)

罗先刚 著



科学出版社

亚波长电磁学

(上册)

罗先刚 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍亚波长尺度电磁波与物质相互作用的新奇现象、物理机理及其在各种电磁学/光学系统中的应用。针对传统光学和电磁学理论存在的原理性障碍,阐述了亚波长尺度突破传统极限的理论和方法,并在此基础上给出了亚波长结构辅助的新电磁学和光学定律。本书是亚波长电磁学学科的第一部专著,涉及的主要内容是作者多年来从事基础和应用研究的成果体现,也广泛收录了国际上其他著名团队的最新结果。

本书适合物理、光学、电磁学等领域的理论和实验工作者、大学教师、研究生和高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

亚波长电磁学.上册/罗先刚著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-049949-3

I. ①亚… II. ①罗… III. ①电磁学 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 225709 号

责任编辑:鲁永芳 赵彦超/责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:44

字数:847 000

定价:398.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

研精闡微
開物成務

鄧賀鋒

2016.12.22

序 一

古人云：“莫见乎隐，莫显乎微”，许多精深的道理往往隐藏在细微之处。历史上取得重要成就的学者往往是从常人没有认识到，或者忽略的地方发现新的现象，建立新的理论，并影响人类社会的发展。光学的发展历程完美地印证了这个规律：在惠更斯之前，以牛顿为代表的经典物理学家一致认为光是一种微粒，尽管惠更斯的波动理论成功说明了光的衍射现象，但它很难解释光的偏振、辐射、吸收等特性，直到麦克斯韦统一电磁场理论以及爱因斯坦正确解释光电效应，关于光的本性的争论才暂时告一段落。

经典电磁学和现代光学通常研究的是电磁波与宏观物质的相互作用，以及微观尺度上的量子效应和应用，对亚波长尺度空间上电磁波的行为缺乏认识，导致许多技术的发展存在难以逾越的障碍。以光的衍射为例，传统理论认为光学成像和传输受到衍射极限的限制，难以在亚波长尺度上操控，严重制约了光子技术的发展。近年来，得益于理论和研究手段的进步，亚波长电磁学取得了快速的发展，其中光子晶体、等离子体激元和超材料三个重要方向均被《自然》杂志作为电磁学发展史上的里程碑。尽管基于亚波长结构的电磁器件在多种系统中发挥了难以替代的关键作用，但目前国际上还没有相应的专著对这一领域进行系统地介绍。本书构建了亚波长电磁学的理论和技术框架，是第一部详细阐述亚波长尺度物理效应、机理及其应用的著作，相关的内容和研究范式将为亚波长领域的开启提供原理和方法支撑。

周炳琬

2016年9月

序 二

电磁学和光学是现代信息社会的重要科学基础。当前,电磁波的应用范围已覆盖关系人类生活和社会安全的许多重要领域。然而,在亚波长尺度,近年来人们在传统电磁学和光学领域观察到一系列新现象。经典理论难以解释这些现象,预示着电磁学理论和方法面临着重大的突破和发展机遇。

纵观百余年的发展历史,亚波长电磁学的研究可分为三个阶段:从19世纪末至20世纪初为亚波长电磁学的萌芽阶段,期间人们发现了一系列亚波长尺度的异常现象,包括金属薄膜的结构色(Faraday, 1857),一维光子晶体滤波(Rayleigh, 1887),人造手性(Bose, 1897)以及金属光栅的异常衍射(Wood, 1902)等;第二个阶段出现在20世纪中后期,初步确立了亚波长电磁学的基本理论体系,包括表面等离子体(Ritchie, 1957)、负折射材料(Veselago, 1968)以及三维光子晶体(Yablonovitch, 1987)等。20世纪末至今为第三个阶段,也是亚波长电磁学的蓬勃发展阶段。随着亚波长结构负折射材料(Pendry et al, 1996, 1999; Smith et al, 2000),小孔的异常透射和聚束效应(Ebbesen et al, 1998, 2002),超分辨透镜(Pendry, 2000; Luo et al, 2004; Zhang et al, 2005),以及任意折射和广义斯涅耳定律(Luo et al, 2008; Capasso et al, 2011)取得理论和实验突破,表面等离子体、超材料、光子晶体等领域逐渐深度融合并交织在一起,衍生出许多新的研究方向。

尽管亚波长电磁学已取得长足发展,但迄今为止国际上尚无一本系统的专著对相关的理论框架、技术和应用进行阐述,这与本领域当前的飞速发展态势极不相称。本书详细地介绍了亚波长电磁学的研究历史和发展现状,阐述了亚波长电磁学的基本现象、效应、理论和应用,相关的方法、思路可以拓展到力、热、电、声等多个领域。十余年来,罗先刚团队先后承担了国家973/863、国家杰出青年科学基金、重点基金等多项国家级项目,在该领域取得了一系列突破性的进展,与国际同行一道奠定了亚波长电磁学科发展的重要基础。本书的部分内容直接来源于上述项目的研究成果,是广大科研工作者和高等学校师生一本很好的参考书。

杨国栋

2016年9月

前 言

电磁学是经典物理学的基础之一，主要内容包括静电场、静磁场、电磁感应和电磁波等。自 20 世纪中期以来，电磁波的重要性不断凸显，它不仅是现代信息社会的基石，也是高功率微波、激光武器等未来先进军事技术的核心。

电磁波的研究横跨原子尺度 (伽马射线) 到若干千米的宏观尺度 (射频信号)。对于任意一种电磁波 (包括可见光、红外、太赫兹、微波等)，其研究范围均可根据研究尺度与波长的关系划分为“超波长”“近波长”和“亚波长”这三个范畴。光学和电磁学最开始研究的范畴属于“超波长”领域，主要研究光和电磁波在界面上的折射、反射等几何光学现象。随着衍射理论的发展，从 19 世纪初期起，“近波长”这一尺度逐渐被广泛研究，并在此基础上出现了包括光栅、波带片在内的多种衍射器件。19 世纪末期以来，随着麦克斯韦方程组和洛伦兹电子论的出现，电磁学的发展取得了重要进展，亚波长这一尺度逐渐受到重视。与此同时，量子力学的诞生进一步使得电磁学的研究尺度深入到原子尺度，并在这一尺度发现了许多光和物质相互作用的新现象，为光子的操控提供了全新的理论。从某种意义上讲，量子力学正是“亚波长”这一尺度向下发展的结果。亚波长尺度的全新物理效应，为突破经典理论的限制奠定了基础。在此基础上，相继产生了许多前所未有的重大应用，包括超衍射成像和光刻、高速大容量光子集成、芯片式生化传感等。

亚波长电磁学是研究物质与电磁波在亚波长尺度下的相互作用，以及其中的现象、规律、机理及应用的学科，包括材料、器件和系统等不同层次的研究内容。从研究尺度而言，亚波长电磁学填补了量子力学与传统电磁学之间的空白，构建了连接微观和宏观物理的桥梁。亚波长电磁学作为一个新的学科分支，其英文定义称为 Sweology，作为 Sub-wavelength Electromagnetics 学科的缩写。

一、亚波长电磁学发展简史

亚波长电磁学的发展历史可按频谱特征分为三个阶段。

第一阶段：纳米技术推动了亚波长尺度异常光学现象的发现

纳米 (10^{-9}m) 是分子和原子所对应的尺度，远小于可见光的波长。随着对自然界极小尺度的不断探索，纳米技术逐渐发展成为人类操控原子和分子的工具，并带来很多光学方面的应用。众所周知，光学研究的一个关键点在于各种光学材料。

然而自然界材料的光学性质具有诸多局限,不能满足现代光学器件和系统发展的需要。1959年,费曼在其著名的演说中即指出^①:“迄今为止,我们一直满足于通过挖掘寻找新材料……可以预见的是,当我们能在小尺度上控制物质的排布时,材料特性的选择范围将被极大地拓展。”这里所指的小尺度即为纳米量级。

纳米技术在光学领域推动的一个重要研究方向是表面等离子体学(Plasmonics),主要研究金属纳米结构中自由电子与光子的集体振荡——表面等离子体激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)。1857年,法拉第研究了半透明纳米金叶的反射和透射特性,发现白光透过之后变成绿色,而反射光的颜色为黄色^②。法拉第同时还合成了金的纳米胶体粒子,并得到了奇异的红色光谱。1902年,美国约翰·霍普金斯大学的Wood记录了金属光栅衍射中的一个异常现象^③:采用连续谱光源入射,在宽度小于钠原子光谱的波长范围内形成一个明显的衍射谷。并且该现象只在 p 偏振光入射时才产生。尽管Wood并没有对该现象给出解释,而仅仅称之为“异常”,但该发现已被公认为表面等离子体领域的开端之一^④。

由于SPP的本性是金属电子的集体振荡,1968年以前,关于SPP的研究大部分是通过电子损失能谱的测试来开展的。1968年,Kretschmann和Otto分别采用全反射棱镜,实现表面等离子体的光学激发,为SPP的研究提供了一种新的方法^⑤。

1977年,Duynes和Creighton等发现吸附在粗糙银电极表面的每个吡啶分子的拉曼信号要比溶液中单个吡啶分子强 $10^4 \sim 10^6$ 倍^⑥。这种基于SPP的拉曼散射增强现象后来被称为表面增强拉曼散射(Surface Enhanced Raman Scattering, SERS),为拉曼信号探测提供了有效的手段。

1998年,表面等离子体学的发展取得了另外一个突破。法国科学家Ebbesen等发现,金属薄膜上亚波长孔阵列在某些特定波长位置表现出异常透射增强效应

① R P Feynman. There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 1960, 23: 22-36.

② M Faraday. The Bakerian Lecture: Experimental Relations of Gold (and Other Metals) to Light. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1857, 147: 145-181.

③ R W Wood. On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1902, 18: 269.

④ D Maystre. Theory of Wood's Anomalies. in *Plasmonics*, ed. S Enoch, N Bonod. Springer Series in Optical Sciences 167 (Springer, 2012).

⑤ E Kretschmann, H Raether. Notizen: Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 1968, 23(12): 2135; A Otto. Excitation of Non-radiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection. *Zeitschrift Für Physik*, 1968, 216(4): 398-410.

⑥ D L Jeanmaire, R P Van Duyne. Surface Raman Spectroelectrochemistry. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1977, 84(1): 1-20; M G Albrecht, J A Creighton. Anomalously Intense Raman Spectra of Pyridine at a Silver Electrode. *Journal of the American Chemical Society*, 1977, 99(15): 5215-5217.

(Extraordinary Optical Transmission, EOT)^①: 小孔阵列的透射率远大于经典衍射理论的预测结果。该现象引起了学术界的极大关注,因为它预示着在亚波长尺度传统光学衍射定律将被打破,为光子集成以及超衍射光刻奠定了基础^②。正是基于这一原因,该发现被 *Nature* 杂志认为是现代表面等离子体学的开端(表 1)。

表 1 光子学历史上的里程碑(www.nature.com/milestones/photons)

| 1600s~1800s | 光的本性的争论 |
|-------------|--------------|
| 1861 | 麦克斯韦方程组 |
| 1900 | 普朗克黑体辐射理论 |
| 1905 | 狭义相对论 |
| 1923 | 康普顿效应 |
| 1947 | 量子电动力学 |
| 1948 | 全息术 |
| 1954 | 太阳能电池 |
| 1960 | 激光 |
| 1961 | 非线性光学 |
| 1963 | 量子光学 |
| 1964 | 贝尔不等式 |
| 1966 | 光纤 |
| 1970 | CCD 相机/半导体激光 |
| 1981 | 高分辨激光光谱和频率测量 |
| 1982~1985 | 量子信息学 |
| 1987 | 光子晶体 |
| 1993 | 蓝光二极管 |
| 1998 | 等离子体激元 |
| 2000 | 超材料 |
| 2001 | 阿秒科学 |
| 2006 | 光机腔体 |

亚波长尺度还有很多奇异的光学结构,其中最典型的是光子晶体。与自然晶体控制电子类似,光子晶体可实现对光子的操控。早在 1887 年,瑞利即发现多层介质膜在一定频率具有全反射特性,并意识到自然界中的很多色彩正是由周期结构中的光学干涉引起的。然而,光子晶体的研究热潮直到一百年后才出现,1987

① T W Ebbesen, et al. Extraordinary Optical Transmission through Sub-wavelength Hole Arrays. *Nature*, 1998, 391: 667-669.

② W L Barnes, A Dereux, T W Ebbesen. Surface Plasmon Subwavelength Optics. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830; X Luo, T Ishihara. Surface Plasmon Resonant Interference Nanolithography Technique. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(23): 4780-4782.

年 Yablonovitch 和 Jone 分别从自发辐射和光子局域两个方面引入了光子晶体的概念^①, 这为光子操控技术提供了全新的思路, 并形成了众多新的应用, 因此被视为光子学发展史上的另一个里程碑 (表 1)。

第二阶段: 微波波段的亚波长电磁学

除表面等离子体和光子晶体外, 亚波长电磁学中另外两个重要领域是超材料 (Metamaterial) 和超表面 (Metasurface)。所谓超材料, 指人工制备的、特征尺寸远小于工作波长、具有超越自然材料特性 (如具有负折射率) 的一类亚波长人工结构材料。超材料是继表面等离子体、光子晶体之后, 亚波长电磁学发展史上的又一个里程碑 (表 1)。超表面是一种二维超材料, 在保持超材料优异电磁性能的同时, 极大地降低了加工难度。

根据麦克斯韦理论, 材料的折射率取决于介电常数和磁导率。关于负折射率的思考始于 1904 年, 但直到 1968 年, 苏联科学家 Veselago 才从理论上系统地阐明负折射率材料中电磁波的传播特性, 指出负折射率材料同时具备负的磁导率和介电常数^②。在此基础上, Veselago 预测了一系列反常的物理现象, 例如电场、磁场和波矢量的左手定则, 逆多普勒效应和逆契伦科夫效应等。Veselago 等开展了大量工作寻找自然界中的负折射率材料, 并发现 CdCr_2Se_4 等磁半导体同时具有电谐振和磁谐振特性。但是由于二者不能调节到相同的谐振频率, 负折射材料的理论一直没有得到实验验证。

为了实现对电和磁谐振的独立调制, 1996 年, 英国帝国理工学院的 Pendry 首次提出利用周期性的金属线, 将传统金属的电谐振频率从光波段压缩到微波波段^③。随后又提出利用周期性的金属环, 在微波波段实现磁谐振^④。上述两种亚波长结构的提出为负折射率材料的发展奠定了基础。2001 年, Smith 等根据 Pendry 的理论模型, 将周期性的金属线和金属开口谐振环结构组合, 构造出世界上第一块等效介电常数和磁导率同时为负值的亚波长结构材料, 并利用著名的“棱镜实验”证实了该材料的等效折射率为负^⑤。

① E Yablonovitch. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2059-2062; S Jone. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2486-2489.

② V G Veselago, E E Narimanov. The Left Hand of Brightness: Past, Present and Future of Negative Index Materials. *Nature Materials*, 2006, 5: 759-762.

③ J B Pendry, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773-4776.

④ J B Pendry, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.

⑤ R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.

负折射材料的研究过程中也存在着一些不同的意见, 这些争论从不同角度推动了整个领域的发展。俄亥俄州立大学电子工程教授 Munk 对 Smith 等提出的负折射率材料提出了质疑^①, 指出在 Smith 的棱镜实验中, 材料样品的折射场的强度比 Teflon 介质棱镜的折射场的强度小了 14~20dB, 因此认为该实验的测试得到的负方向的场分布并非是真实的折射场。然而, 后续的许多实验结果表明负折射的强度可以大幅提高, 从而化解了 Munk 的质疑^②。此外, Valanju 等认为在常规介质和负折射材料的交界面处, 群速度的传播方向只能沿正方向折射^③。但正如 Pendry 指出的, Valanju 等把干涉条纹的前进方向当成了能量的传播方向^④, 因而得出了错误的结论。

2006 年, 超材料的研究取得了重要进展。Pendry 和 Leonhardt 分别提出了电磁空间的变换理论 (Transformation Optics, 变换光学)^⑤。Pendry 预测结合变换光学和超材料, 可实现“电磁隐身”等具有“科幻”性质的功能, 并随即与 Smith 等合作在微波段完成实验验证^⑥。此后, 大量关于“变换光学”和“隐身衣”的理论迅速发展, 但是由于光波段器件的加工难度较大, 早期很多验证工作均是在微波波段开展的。

第三阶段: 亚波长电磁学研究领域的融合

表面等离子体和光子晶体一开始便是从光波段开展研究, 而超材料的发展历史具有鲜明的微波烙印。近年来, 这些研究领域各自均在整个电磁波段取得快速发展。此外, 很多现象和器件中, 表面等离子体、光子晶体和超材料的内涵相互交织和融合, 难以进行严格区分。为了更准确地反映学科的发展, 亚波长电磁学作为一个完整的概念逐渐被学术界接受。

亚波长电磁学的第一个融合体现在表面等离子体和超材料领域。以利用金属薄膜上的表面等离子体实现超衍射成像为例, 2000 年, Pendry 提出了“负折射完美透

① B A Munk. *Metamaterials: Critique and Alternatives*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

② J Valentine, et al. Three-Dimensional Optical Metamaterial with a Negative Refractive Index. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-380.

③ P M Valanju, R M Walser, A P Valanju. Wave Refraction in Negative-Index Media: Always Positive and Very Inhomogeneous. *Physical Review Letters*, 2002, 88: 187401.

④ J B Pendry, D R Smith. Comment on Wave Refraction in Negative-Index Media: Always Positive and Very Inhomogeneous. *Physical Review Letters*, 2003, 90: 029303.

⑤ J B Pendry, D Schurig, D R Smith. Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-82; U Leonhardt. Optical Conformal Mapping. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.

⑥ D Schurig, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.

镜”的概念^①，指出当倏逝波透过等效折射率为 -1 的材料时，倏逝波的幅度不仅不会衰减，反而会以指数规律放大。倏逝波信息的恢复，可有效解决传统的光学成像器件衍射受限问题，理论上可以恢复成像物体的所有光学信息，因此被称为完美成像（图 1）。Pendry 指出，在近场准静态近似的条件下，只要介电常数为 -1 ，一层金属薄层（磁导率为 1）即可实现超衍射成像。2003 年至 2005 年，表面等离子体在超分辨成像和光刻中的作用被逐渐认识到，由于 SPP 的短波长特性，一层金属薄膜即可实现高频信息的近完美超衍射传输^②。

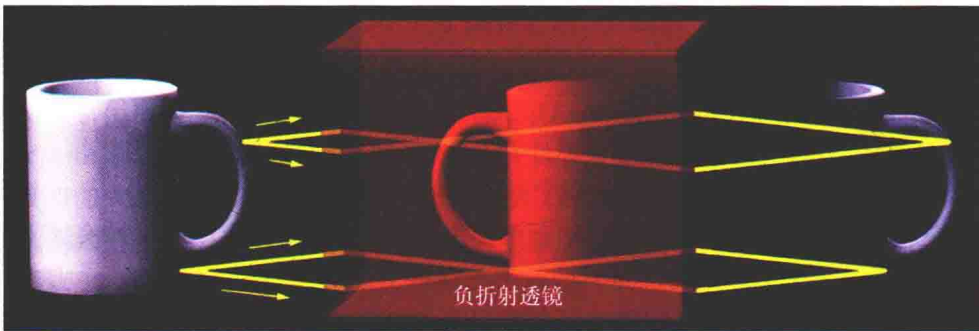


图 1 负折射成像效果^③

亚波长电磁学的另一个融合体现在利用微波波段的等效电路方法分析光波段的电磁响应。宾夕法尼亚大学的 Engheta 在 *Science* 杂志撰文指出传统微波段的等效电路概念（如电容、电感、电阻等）可被用来分析光波段的各种介质、金属结构的谐振特性，为表面等离子体器件的分析提供了全新的工具^④。除了作为一种连接各个领域的手段，等效电路以及相关的超表面理论可解决传统超材料、电磁带隙材料面临的参数不唯一等困难^⑤，目前已成为本领域一个通用的分析方法。

① J B Pendry. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.

② Luo, Ishihara. Surface Plasmon Resonant Interference Nanolithography Technique; N Fang, et al. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.

③ J B Pendry, D R Smith. The Quest for the Superlens. *Scientific American*, 2006, 259(1): 60-67.

④ N Engheta. Circuits with Light at Nanoscales: Optical Nanocircuits Inspired by Metamaterials. *Science*, 2007, 317(5845): 1698-1702.

⑤ M Pu, et al. Design Principles for Infrared Wide-Angle Perfect Absorber Based on Plasmonic Structure. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17413-17420; M Pu, et al. Anisotropic Meta-Mirror for Achromatic Electromagnetic Polarization Manipulation. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131906.

亚波长电磁学的融合还体现在其各个子领域的研究内容具有很强的相关性。譬如负折射现象最初被认为是超材料特有的现象,然而目前已经发现,在表面等离子体、超表面以及光子晶体中均可以实现电磁波的负折射。

二、亚波长电磁学的新理论

新学科的发展一般要经历“新现象的发现”“新机理的分析 and 争论”到“新理论的建立”和“工程应用”这几个阶段。在亚波长尺度各种奇异现象的基础上,经过对电磁相互作用的详尽分析,目前已经形成了一系列全新的亚波长电磁调控理论。如表 2 所示,除“负折射理论”“表面等离子体理论”和“光子带隙理论”这几个常见理论外,还有很多与电磁波基本性质密切相关的理论。

表 2 亚波长电磁学中的主要理论

| | 主要结论 | 意义 | 应用 |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 负折射理论 ^① | 折射率可为负 | 改写折射定律 | 完美成像、 变换光学器件等 |
| 表面等离子体理论 ^② | 表面等离子体具有短波长、 定向传输、 局域场增强等异常特性 | 突破衍射极限 | 超衍射成像/光刻, 生化传感、光存储等 |
| 光子带隙理论 ^③ | 周期结构可调控光子带隙 | 为操控光子的量子 特性奠定基础 | 滤波器、波导、 谐振腔、拓扑绝缘体等 |
| 超表面辅助的折反射理论 | 引入梯度相位, 可实现任意方向的折射和反射 | 改写折反射定律 | 平面光学和电磁器件, 大口径薄膜望远镜等 |
| 超表面辅助的非涅耳理论 | 引入表面亚波长结构, 可任意改变非涅耳透射和 反射系数 | 改写非涅耳公式 | 相位调控、偏振调控等 |
| 超表面辅助的吸收理论 | 调控超表面的色散, 可实现近完美宽带电磁吸收 | 打破吸收极限 | 隐身、光伏等 |

在传统理论框架中,电磁波的基本特征包括频率、偏振、振幅和相位等,其传播行为主要包括折射、反射、衍射、吸收和散射。负折射理论已经表明折射角可与入射角位居法线同侧(违反传统斯涅耳定律)，“超表面辅助的折反射理论”进一步说明通过在表面上引入梯度相位,可实现任意角度的折射和反射,从而突破了传统

① V G Veselago. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics USPEKHI*, 1968, 10(4): 509-514.

② A V Zayats, I I Smolyaninov, A A Maradudin. Nano-Optics of Surface Plasmon Polaritons. *Physics Reports*, 2005, 408(3-4): 131-314.

③ K M Ho, C T Chan, C M Soukoulis. Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures. *Physical Review Letters*, 1990, 65: 3152-3155.

斯涅耳定律的限制^①。此外，“超表面辅助的菲涅耳理论”表明亚波长结构可改写传统的菲涅耳公式，在改变折射/反射方向的基础上，对电磁波的透射/反射系数以及响应频谱进行调制。

亚波长电磁学的另一个重要理论是“超表面辅助的吸收理论”。传统吸波材料的厚度与带宽成正比，吸收性能受到因果律的限制^②。利用亚波长结构的色散可调属性，可逼近甚至突破上述理论极限，从而为新型吸波材料的设计奠定基础。

三、亚波长电磁学的应用

亚波长尺度众多异常现象的发现，以及突破传统限制的新理论体系的建立，预示着本领域必然将产生大量实际应用。这些应用是人们长久以来没有意识到，或者即便认识到也无法通过传统方式实现的。由于这些引人注目的潜在应用，亚波长电磁学在全世界范围内引发了研究热潮。

1. 表面等离子体超衍射光刻

传统电磁学和光学在发展过程中面临诸多原理性的障碍，其中最著名的是显微镜中的衍射极限问题。1873年，阿贝指出显微镜的分辨率不可能小于半波长。众所周知，人眼能感光的最短波长约为380nm，因此传统显微镜的分辨率最小只能到200nm左右，从而限制了人们对分子以及更小尺寸物体的认识。与显微镜类似，光学光刻的分辨力也主要决定于工作波长和数值孔径，严重制约了微电子技术和其他微细加工领域的发展。

表面等离子体具有短波长特性，其最典型的应用之一是超衍射光刻(图2)。2003年，利用表面等离子体光刻技术在436nm波长实验获得了30nm的光刻图形，达到了衍射极限(半波长)的 $1/7$ ^③。2004年，表面等离子体光刻正式被广泛接受^④。最近，利用表面等离子体共振腔效应，在单次曝光条件下实现了22nm节点的光刻^⑤。亚波长电磁学领域奠基人Ebbesen等在*Review of Modern Physics*上指出该技术可作为“传统复杂且昂贵的光刻方案的可行替代技术”^⑥。土耳其著名学者Ozbay

① X Luo. Principles of Electromagnetic Waves in Metasurfaces. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58: 594201.

② K N Rozanov. Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1230-1234.

③ H Yao, et al. Patterining Sub 100nm Isolated Patterns with 436nm Lithography. in *2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference*. Japan: IEEE, 2003, 7947638.

④ Luo, Ishihara. Surface Plasmon Resonant Interference Nanolithography Technique.

⑤ P Gao, et al. Enhancing Aspect Profile of Half-Pitch 32nm and 22nm Lithography with Plasmonic Cavity Lens. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 093110.

⑥ F J Garcia-Vidal, et al. Light Passing through Subwavelength Apertures. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 8: 729-787.

也在 *Science* 杂志撰文, 将该光刻技术列为表面等离子体领域的五个重要发展方向^①。而 Thomson Reuters 旗下的 Science Watch 网站在“Map of nanoscience”专栏中将表面等离子体光刻与异常透射现象一起作为表面纳米科学领域的重要里程碑工作。

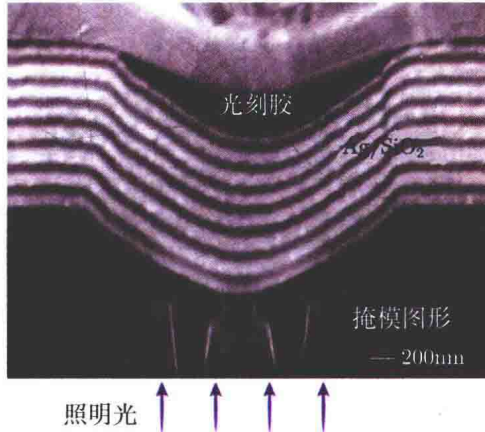


图 2 基于表面等离子体的缩小光刻^②

2. 平面光学元件

为了实现特定的波前调制功能, 传统的折射光学元件大多采用曲面面形结构, 例如凸透镜、凹透镜、非球面镜等, 较为笨重且难以集成; 衍射光学元件, 如 20 世纪末发展起来的二元光学元件虽然能在一定程度上实现光学器件的平面化, 减小器件重量, 但其厚度仍远远大于响应波长, 且具有色差大、视场小等限制。

亚波长电磁学的出现为减轻传统光学系统的负荷, 以及实现光学系统集成化提供了有效的技术途径。亚波长结构的灵活设计能力使其可实现任意的相位、振幅和偏振调制, 因此在很多特定的应用环境下, 可利用简单的平面化亚波长结构代替传统光学系统中众多的曲面元件, 降低系统的复杂度, 提高光学系统的可靠性, 促进集成光学系统和空间光学系统的发展。

2005 年, 出现了一类基于表面等离子体效应的新型平面光学元件^③。利用金属狭缝中表面等离子体传播常数随宽度变化的特性, 可实现任意局域相位调节, 从而建立了超表面辅助的折反射定律 (Metasurface-assisted Law of Refraction and Reflection, MLRR), 也称为广义折反射定律。2011 年, 哈佛大学 Capasso 教授的

① E Ozbay. Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions. *Science*, 2006, 31115758: 189-193.

② X Luo. Subwavelength Electromagnetics. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(2): 138-150.

③ Luo. Principles of Electromagnetic Waves in Metasurfaces.

工作进一步引起了国际上的研究热潮^①。MLRR 可为下一代平面光学和电磁学器件奠定基础，典型的应用包括平面透镜、平面轨道角动量器件、大口径薄膜望远镜等^②。

以大口径薄膜透镜为例 (图 3)，亚波长结构超表面可极大减小整个系统的重量，使得 20m 以上口径的空基望远镜成为可能。同时，超表面可解决传统衍射元件面临的色散和视场问题，实现宽带、大视场成像。



图 3 大口径薄膜望远镜

3. 生化传感

生化传感是指对各种生物和化学物质进行检测的技术，具有实时、灵敏、稳定等诸多要求。生化传感不仅对生物医疗和生命安全具有重要意义，也是未来战争中应对各类生化战剂威胁并克敌制胜的关键之一，例如生化传感技术可以实现对化学战剂、生物战剂和爆炸物的实时探测。

一般而言，基于亚波长结构的生化传感技术主要与 SPP 以及其他类型的表面波效应有关。从原理上讲，基于 SPP 的传感技术大致可分为两类：第一类是表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 生物传感技术，利用的是传导表面等离子体共振峰对被检测介质折射率十分敏感这一特性，通过检测反射光强度极小值的角度位置变化，或波长变化推知被检测物质的折射率变化。第二类是局域表面等离子体共振 (Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 生物传感技术以及基于 LSPR 的表面增强拉曼散射 (SERS) 技术，利用局域场增强特性，极大提高

^① N Yu, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, 2011, 334: 333-337.

^② M Pu, et al. Spatially and Spectrally Engineered Spin-Orbit Interaction for Achromatic Virtual Shaping. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9822; M Pu, et al. Catenary Optics for Achromatic Generation of Perfect Optical Angular Momentum. *Science Advances*, 2015, 1: e1500396; W Pan, et al. A Beam Steering Horn Antenna Using Active Frequency Selective Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 6218-6223; Luo. Principles of Electromagnetic Waves in Metasurfaces.

信号强度。

4. 电磁隐身

传统电磁隐身的主要手段包括外形设计和电磁吸收。外形设计主要是在器件的外表面设计特定的反射面,将入射的电磁波反射到其他方向。电磁吸收则是在装备表面覆以具有电磁吸收性能的特殊材料,从而缩减回波信号强度。一般而言,外形设计需要牺牲装备的机动性能,而传统电磁吸波材料存在带宽窄、不能自由设计等缺点。

亚波长超材料和超表面的出现,为吸波材料的设计提供了新的思路。研究表明,利用超表面中的色散特性可显著拓展吸收带宽,仅需 0.3nm 厚的材料即可实现覆盖微波、太赫兹和可见光的完美吸收体,从而颠覆了传统吸波材料带宽-厚度比受限的理论^①。此外,近年来出现了一种基于超材料的新型电磁隐身方案——虚拟赋形技术 (Virtual Shaping)^②。通过设计空间非均匀的亚波长结构,对入射雷达波施加梯度相位,可将电磁波反射到非威胁方向,从而缩减雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS)。在虚拟赋形技术中,由于不需要电磁吸收,基材的选择范围大幅拓展,可以方便地实现红外、微波多波段兼容,以及在各种极端环境下的隐身。此外,由于不用改变目标的实体外形,该技术将可用于现有非隐身武器装备的升级换代。

电磁吸收和虚拟赋形技术都只能在某些特定方向减小探测几率,不能实现完美隐身。2006 年,变换光学的出现首次使得完美隐身成为可能。根据变换光学理论,折射率变化的超材料可按需要任意弯曲光线。利用该材料制成隐身球壳可使电磁波绕过物体 (图 4),使被隐藏物不被光学或其他电磁探测器发现^③。然而,迄今为止,现有变换光学隐身技术仍面临带宽受限、制备复杂等理论和技术瓶颈,需要进一步深入研究。

5. 电磁辐射

以天线为代表的电磁辐射器件是微波通信、光学通信等领域的核心器件。传统天线的辐射性能受限于天线的口径和天线的结构形式。为了提高天线的辐射能力,不得不增加天线的尺寸,或者采用具有曲面面形的天线,这无疑增加了天线的

^① Q Feng, et al. Engineering the Dispersion of Metamaterial Surface for Broadband Infrared Absorption. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2133-2135; M Pu, et al. Ultrathin Broadband Nearly Perfect Absorber with Symmetrical Coherent Illumination. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2246-2254; Rozanov. Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers.

^② J R Swandic. Bandwidth Limits and Other Considerations for Monostatic RCS Reduction by Virtual Shaping. (Bethesda M D: Naval Surface Warfare Center, Carderock Div., 2004); Pu, et al. Spatially and Spectrally Engineered Spin-Orbit Interaction for Achromatic Virtual Shaping.

^③ Pendry, Schurig, Smith. Controlling Electromagnetic Fields.