

未来十年纳米光子学若干重点发展领域

孙桂林¹ 张利沙² 杭凌侠^{1,†}

(1 西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室 西安 710032)

(2 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院 重庆 400067)

2012-11-07 收到

† email: hanglingxia@163.com

DOI: 10.7693/wl20131007

Key developments of nanophotonics over the next decade

SUN Gui-Lin¹ ZHANG Li-Sha² HANG Ling-Xia^{1,†}

(1 Institute of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

(2 School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

摘要 纳米光子学已经对人们的日常生活产生了重要影响,并且纳米光子学器件产品有强大的市场需求,因此其研究结果可以很快转化为商品。文章介绍了在未来5到10年内对光子工业有重大影响并且有望进入商品市场的11个纳米光子学领域,其中包括:纳米尺度量子光子学、全光路由、用于增强磁存储的表面等离子体光子学、用于诊断治疗和药物输送纳米光子学、纳米成像、分子尺度上的化学与生物传感器、纳米标签、纳米尺度上操控光场的分布(光伏器件和LED/OLED)、原型试制的新技术、量身定制光学特性的纳米光子材料以及太赫兹技术等,希望文章能对中国的纳米光子学研究及其工业化应用有一定帮助。

关键词

纳米光子学, 表面等离子体光子学, 发光二极管/有机发光二极管, 太阳能光伏器件, 纳米量子光学, 生物光子学, 纳米传感, 纳米标签, 纳米光刻, 纳米光子材料, 太赫兹光子学

Abstract Nano photonics is already playing an important role in our daily lives, and its market products are in great demand. In this article we highlight eleven areas which are expected to have important impact on the photonics industry and commercial applications within the next five to ten years. These include: nanoscale quantum optics, all-optical routing, plasmonics for enhanced magnetic storage, optical diagnosis therapy and drug delivery, nanoscale imaging, chemical and biological sensing at the molecular scale, nanotagging, manipulation of light distribution at the nanoscale (solar cell and light emitting diodes), new processing techniques for prototyping, nanophotonic materials with tailored optical properties, and terahertz devices.

Keywords nanophotonics, surface plasmonics, light emitting diodes, solar cells, nano-quantum optics, biophotonics, sensing, tagging, lithography, nanophotonic materials, THz photonics

1 引言

纳米光子学(nanophotonics)是目前发展最为迅速的现代光学分支之一,所涉及的器件特征尺寸与波长在同一个量级。其发展动力不仅仅来自于人们对微纳尺度上或亚波长尺度上对光性质变化的浓厚研究兴趣,同时还来自于市场的巨大需求和工业界的强力投入。例如,由于数码相机和手机等产品的普及,图像传感成像器件有巨大的市场需求,像STMicroelectronics公司、松下等国际领先企业均有大量投入研究互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)器件;而像飞利浦、丰田等对发光二极管(LED)和有机发光二极管(OLED)的研究成果也已经应用到其相应的产品当中。就研究的广泛性而言,学术界一直在致力于探索和研发微纳米光子学的各个领域的可能的应用。微纳米光子学有望设计出超级光子器件(如图1所示的单分子晶体管)并突破现有的一些技术极限,其实际应用包括半导体制造、光通信、传感成像、传感测量、显示、固体照明、生物医学、安全(security)、数据存储、太阳能、光互联等等。例如,全新的光子集成电路(photonic integrated circuits, PICs)不仅体积微小,速度更快,容量更大,而且所消耗的电能更少。

我国在微纳光子学研究方面也取得了多方面的成果,特别是LED/OLED的部分研究成果已经应用到实际产品中,固体照明和信息显示技术在世界上独占鳌头。本文仅对一些预计能在未来5到10年内对光子工业有重要影响的纳米光子学研究领域做一介绍,主要内容取自欧洲纳米光子学专家的报告^[1]以及我们的一些观点和看法。具体内容包括:纳米尺度量子光子学、全光路由、用于增强磁存储的表面等离子体光子学、用于诊断治疗和药物输送的纳米光子学、纳米成像、分子尺度上的化学与生物传感器、纳米标签、纳米尺度上操控光场的分布(光伏器件和LED/OLED)、原型试制的新技术、量身定制光学特性

的纳米光子材料以及太赫兹技术等。本文重点是简要综述重要领域、指出这些领域目前存在的问题和努力方向,不涉及具体原理。希望本文能对推动我国微纳米光子学研究工作的迅速发展及其工业化应用有一定的帮助。

应该注意的是,一种微纳光子学器件的应用可能涉及几个领域,例如,表面等离子体光子学器件几乎可以用于下面介绍的所有这些最具应用潜力的领域。虽然这些器件的原理都涉及到表面等离子体光子学,但对这些器件的要求是不同的,因此有不同的研究重点。

2 纳米光子学未来十年若干重点发展领域

2.1 纳米尺度量子光子学(nanoscale quantum optics)

量子信息学和量子光学是光子学的重要应用领域之一,但到目前为止,主要涉及的还是传统光学与激光器以及自由空间光束。纳米量子光学可以建造芯片上的集成光路,以帮助实现量子信息处理的功能,不仅可以将现有概念在芯片上实现,而且还可能出现新颖的现象,其中有些是在

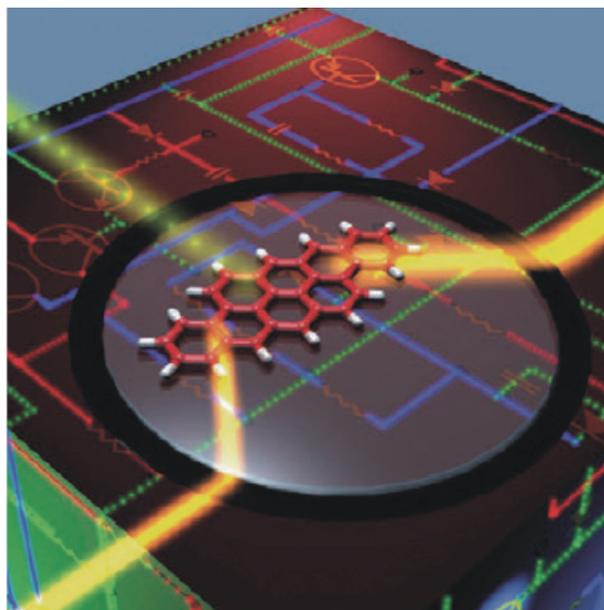


图1 单分子晶体管(摘自Nanophotonics Foresight Report, 2011)

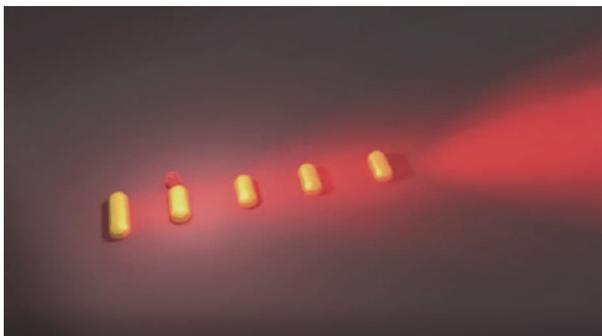


图2 光子纳米天线控制单个光子发射 (摘自 Nanophotonics Foresight Report, 2011)

预料之中,有些则是全新的现象伴随着全新的概念。例如,量子点激发态已经在光子晶体谐振腔中实现^[2];用等离子纳米线和金属纳米孔阵列可以传输量子信息,实现纠缠和反聚束(antibunching);用量子点的等离子体光子纳米天线可以实现可见光定向辐射^[3]。图2为用光子纳米天线控制单个光子发射。纳米光子学可以将微纳激光器集成在芯片上,因此每单位面积上的功能大为增加。利用纳米结构控制辐射不仅可以为量子光学提供新的光源,而且还可以改善LED和垂直腔表面发射激光器的性能。利用空间高度结构化的光场在纳米尺度上控制光辐射,可以突破吸收和辐射的传统量子选择规则,从而提供了多种可能的应用。在芯片光源上产生纠缠态光量子也许是近期研究的目标之一。

2.2 全光路由(all optical routing)

为了充分利用光学数据传输所拥有的带宽,克服电子器件带宽的限制,电光/光电转换器件必须微型化。很显然,纳米集成光路可以极大地缩小诸如调制器、开关和激光器等器件的物理尺寸和功耗。更重要的是,纳米光子学可以操控全光信息处理所需要的光与物质的相互作用。这些相互作用的增强可以减小为了得到指定功能所需要的控制光源的输出强度。其中全光调制和全光波长选择路由是两个非常具有挑战性的领域。前者需要超快的时间和高度的非线性,后者的器件尺寸和网络集成性可以充分地利用纳米光子学

方法来实现。目前已经验证了的光数据处理全路由方法有:(1)光子晶体器件:二维光子晶体谐振腔结构大约仅为波长平方的大小,其谐振特性减小了实现光开关所需要的折射率变化量。飞焦耳(fJ)光开关已经经过实验验证,下一步是平衡执行功率和带宽;(2)慢光器件:在光子器件和表面等离子体的光子结构中的慢光具有增强光与物质相互作用的功能,因为这些器件和结构相当于纳米光子谐振腔里面的光陷阱。现在已经实验演示了5 μm长、开关时间短于200 fs的表面等离子体光子开关。在慢光方面,需要平衡由Kramers—Kronig关系决定的慢光指数和带宽;(3)由于有较强的场增强效应,表面等离子体的光子结构可以大大加强非线性过程,因而可以实现高效增强的二阶和三阶光学非线性效应。使用此类表面等离子体光子波导、光子晶体以及超材料(meta-material)中的光来控制光,已经实现了亚皮秒量级的光开关,尺寸仅有几百纳米^[4]。目前的重要问题是如何减少损耗,如何与CMOS兼容,以及如何由单一元器件过渡到全光线路和系统等。

2.3 用于增强磁存储的表面等离子体光子学(plasmonics for enhanced magnetic storage)

自第一个硬盘商品化以来,单个磁比特的面积已经缩小了8个量级,但是,传统的垂直磁记录只能再缩减2个量级就到极限了。如果要进一步减小面积,磁介质的颗粒尺寸必须小于7 nm,因而所需要的开关场的磁流密度超过了已知材料的最大磁流密度。其中一个改善措施是,磁记录介质写入时加热磁介质,写完后再快速冷却。由于要加热的区域尺寸已经小于衍射极限,因此需要有如纳米光子天线那样的近场器件,其尺寸和形状应该优化^[5]以便产生表面等离子体激元。现在已经报道的微结构的应用实例有:“Lollipop”,“nanobeak”和E天线等。目前的主要挑战是要找到一种更高密度的记录介质,其磁道宽度与表面等离子体光子天线的尖顶相当。另外读写速度也是个问题。到现在为止,Seagate和日

立是此领域的领军者。表面等离子体光子学可以将热辅助磁记录达到一个更高的数据密度。

2.4 纳米光子学用来诊断、治疗和药物输送 (optical diagnosis, therapy and drug delivery)

光与纳米粒子的相互作用可用于成像, 可以通过局部加热直接杀死癌变细胞, 还可以进行光导药物输送等医学治疗和诊断。最有希望的是基于表面等离子体激元的癌症治疗, 其中包括使用纳米尺度的贵金属纳米粒子, 用于摧毁已定标的癌变组织。这项技术涉及表面化学, 它可发现能将纳米粒子聚集的变性组织, 并能精心设计具有特殊光学特性的纳米粒子。它所用的光源的光谱一般选在对人体组织透明的近红外区, 可用于治疗如前列腺癌等常见癌症, 临床试验正在进行^[6]。随着纳米材料合成技术和生物化学标靶技术的不断进步以及我们对如何调整纳米粒子的光学特性的深入理解, 相信在未来3到5年内该领域将有重大突破。其他一些值得重视的研究方向包括: 利用纳米粒子或分子复合体将药物输送到人体特定部位的标靶释放技术和光诱导药物释放技术(即打开所输送药物的外壳的技术), 这些均依赖于由紫外光诱导的复杂生物分子形貌变化的研究。这方面的一个重要挑战就是如何改善分子系统的响应来降低能量辐射, 以限制对照明点周围细胞产生的有害负效应。另外一个问题是, 研究表面等离子体激元谐振与局部环境变化的灵敏度, 组织表面上的金属纳米粒子监测溶液里微量生物分子最低浓度等。与微流输送系统 (microfluidic circuits) 相结合, 这种纳米光子学平台有望成为一种新趋势的主要工具: 即按病人个体制定高度集中的治疗方法和措施, 同时使有害的副作用最小化。

2.5 纳米成像 (nanoscale imaging)

现代光学显微术中所采用的超分辨技术已经超越了可见光的衍射极限, 研究者可以用它来分辨纳米级的物体。通过组合空间聚焦设计和非线性

性抑制激发 (de-excitation), 受激发射损耗 (STED) 技术已经令人信服地实现了 20 nm 的分辨率。STED 技术最主要的应用就是纳米量级的生物成像, 当然它也可以在纳米制造的技术检测和质量控制领域扮演重要角色。为了克服 STED 需要扫描的缺点, 需要采用结构化照明的方法, 这样就可以实现大面积分辨率增强, 这样一种特殊的空间振幅/位相扫描方式, 可以提供亚波长图像信息。在稀疏 (sparse) 成像情况下, 即在有限的光源 (例如单个分子) 情况下, 可以使用局域化 (localisation) 显微术, 例如使用光子统计学和远场显微空间响应来重构高分辨图片, 可以显示纳米量级生物体低于 50 nm 的细节, 灵敏度在光子计数水平以下。多数超分辨方法需要检测合适的荧光标记, 除了传统的染料标记和荧光蛋白标记外, 在活体生物医学研究中, 采用量子点的受控细胞/生物组织定标技术也基本成熟。其他几种非常有前途的纳米尺度成像系统包括: (1) 纳米光子天线可以实现高浓度下的单分子成像^[7]; (2) 在太赫兹区使用低频辐射的尖部增强型扫描显微术; (3) 不需要瞬逝波的超震荡 (super-oscillation), 例如采用已经演示成功的纳米孔阵列产生亚波长的光定域 (localization of light) 技术, 就可以用它来制作聚焦和超分辨成像器件。纳米成像涉及到探针、光学天线或超透镜 (super-lens) 等技术, 应用这些技术, 可以实现衍射极限的突破。图 3 为用光子纳米探针扫描微结构。

2.6 分子尺度上的化学与生物传感器 (chemical and biological sensing at the molecular scale)

基于纳米光子学的分子尺度传感器可以实现单分子尺度上的化学和生物样品的检测和辨识, 同时还能检测多种分析物, 其应用范围包括食品安全、污染控制、医学诊断等。为了增加光与物质的相互作用, 以提高检测准确度, 最近几年, 人们探索和研究了光学纳米天线、表面增强拉曼光谱术、高灵敏度表面等离子体激元谐振以及表面增强中红外吸收光谱术等^[8]。

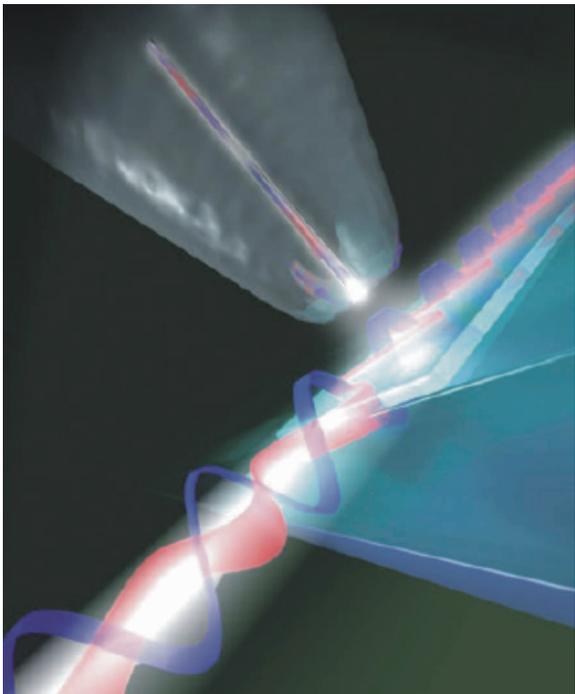


图3 光子纳米探针扫描微结构(摘自 Nanophotonics Foresight Report, 2011)

目前的主要挑战是如何将灵敏度提高到单分子检测的水平。需要特别关注度是,在红外波段,各种因素引起的吸收峰高度空间重叠,如何保证检测到的只是标记的分子相当困难。也就是说,要拒绝检测结果出现假的阳性等。对于后者,应当重视传感器的表面功能化以及与微流输送系统的集成等问题。由于纳米光学传感区通常只是在一个较窄的光谱范围内有很高的电磁场增强,因此在不同光谱窗口(如光学和太赫兹区)同时实现场增强也是一个主要障碍。这个障碍的突破将可以实现复杂分子的“分子指印”(分子指印是每个分子的固有特征,类似于人的指纹的唯一性)。这需要在同一个传感区检测它们的旋转、振动以及电子谐振等,而且也可以实现不同分子种群的同时多光谱成像。

在开发纳米光学传感系统时,必须考虑集成问题,以便可以在需要检测的地方和野外使用,另外便携式装置应该能让非专家容易操作使用。这方面包括将传统的微光子单元与电子单元有效连接,特别是能并行处理高密度纳米光子传感

(如用金属纳米谐振腔阵列成型的表面结构)信息的能力。

2.7 纳米标签

纳米标签技术可以用于标记和防伪等,纳米级光学谐振腔和(或)超材料(metamaterials)阵列可以产生新颖的光学响应,如负折射、窄光谱区内产生超强的光散射、纳米级条形码、微米级射频主动标记等。

目前在产生光学隐身和宽光谱光学聚集器(concentrator)变换光学方面的研究将可能在未来的标签技术领域获得应用。主要难题在于如何平衡技术和相关的制造成本,技术是指复杂的纳米表面产生肉眼能够看出或者便携扫描器能够识别的光学响应。目前,如何定义纳米标签技术的评价函数还是个问题。很明显,制造成本是一个主要问题,此外还有诸如编码深度、面积、要求的读出功率、信噪比等方面的问题。另外一个主要挑战是开发一种合适的制造技术,可以使用柔性衬底,如布料或银行支票等。如有机超材料等有机多层结构材料体系的图案化技术有可能转化为塑料电子学领域,可以在柔性衬底上做处理,因而生成廉价的标签。

作为例子,下面介绍一种新型非接触大容量纳米光子标签技术^[9]。它是基于纳米结构光栅的条形码,标签由几个重叠的衍射光栅形成,仅一维光栅就可以产生6万8千种不同的标签,理论极限可以达到 10^9 ,如果是二维,则可以达到 10^{21} 。这项技术的高编码能力以及多重检测可以精确地测量多种分子相互作用,因而在生物技术的多个领域如基因组学、蛋白质学、高输出筛选和医疗诊断等产生新的机遇。

2.8 纳米尺度上操控光场的分布

纳米结构能够用来优化发光二极管(light emitting diode, LED)的光辐射能力和太阳能器件的光吸收能力。光辐射可以受控以增加辐射效

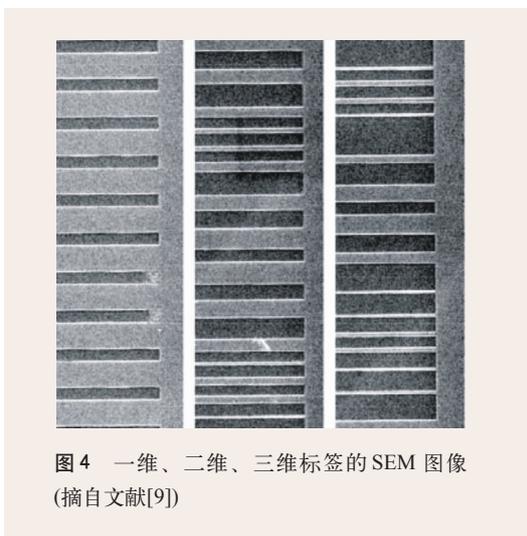


图4 一维、二维、三维标签的SEM图像
(摘自文献[9])

率、改善空间调控(局部化)、角分布(方向性)、偏振(各向异性)以及光谱线宽等。利用现有的纳米制造技术目前已经成功演示了多种耦合的纳米系统。例如,辐射衰减率增加了20倍以上,强度增加了1000倍,辐射限制在很小的角锥之内^[10]等耦合纳米系统。

LED表面的纳米结构化使光能够有效地在大角度范围内输出。对于窄光谱输出,已经设计了多种使用半导体材料的周期性光子晶体结构,其带隙可抑制面内的自发辐射,这种优化的周期对称结构能够增强在“正确”方向的光输出。对于宽光谱辐射,非对称结构甚至随机结构更为有利。一般使用电介质材料以避免损耗,目前已经实现了很高的光转换效率,例如红光达60%以上,蓝光达80%以上,市场上的LED光转换效率接近50%。

虽然有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)技术有了巨大的进展,但是,高亮度、大面积、高效率和长寿命等问题始终没有解决。通过纳米结构可以增强主动发光区光学材料的混合,将分子辐射耦合到谐振表面等离子体结构和天线中,可以同时改善辐射性能和光提取效率。

根据互易原理,纳米结构化的表面也同样适合于提高光俘获能力。太阳能器件的光吸收率相对比较低,纳米结构可以用来增加太阳能器件的

光吸收,保证捕获足够多的光能。支持表面等离子体激元的金属纳米结构有很多优点,例如,它可以作为波长散射器或谐振天线将入射光捕获并耦合到吸收层,背面的纳米金属膜可以有效地将光转化为表面等离子体激元,以便耦合到吸收层,同时,这种金属纳米结构又可以充当电极来收取光电流。虽然目前主动层(即以主动方式工作的介质结构层)厚度已经降到100 nm以下^[11],效率也提高了两个数量级,但是仍然有以下问题需要解决,如结构的优化、用较便宜的金属代替金、大规模制造以及合适的透明电极等。表面等离子体光子学器件可以实现正入射下红外1.6 μm处99%的吸收,当入射光在正负80度的角锥范围内,也有非常高的吸收率,但是如何将这些光耦合到主动层也是一个需要解决的问题^[12]。

另外一种研究方法是控制入射光(例如控制入射光的宽带脉冲的位相或偏振),通过优化复杂的纳米系统和光的空间分布来实现相干控制。调整入射相干光的远场空间分布,可以设计出所需的纳米级光热点(hot-spot);改变入射光的空间位相分布,可以移动这种纳米光热点,从而有效

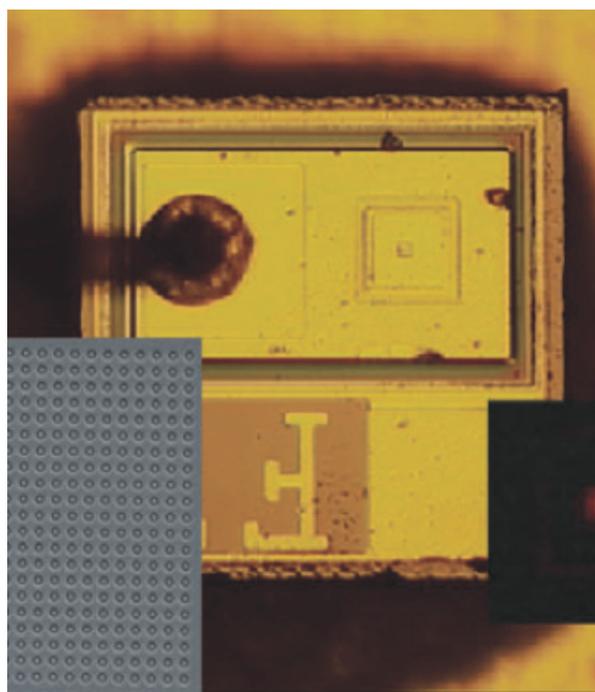


图5 等离子体结晶LED(摘自 Nanophotonics Foresight Report, 2011)

地实现亚波长上的光控制。目前该项研究主要是在学术界进行，而利用合适的位相板或LCD阵列，可使这项研究有希望实现廉价的商业应用。

目前LED和太阳能器件面临的困难是寻找合适的光学透明电极，这种透明电极对提高效率和提取率非常关键。传统的透明电极ITO有下面一些限制：比较贵、易碎因而不能用于柔性器件。现在正在探索和研究超薄(2—5 nm厚)的金属膜以及石墨膜，当然制造大面积高质量的此类薄膜也是个问题。图5为等离子体结晶LED。

2.9 原型试制的新技术

纳米光刻是目前的主要技术，可以在300 mm的硅片上常规地实现30 nm的分辨率。原则上半导体工业的所有方法都可以直接用于表面等离子体光子学线路和超材料等的原型试制。然而这些方法都是要大规模生产才经济适用，因此，对纳米光学试制来说，其成本是一个大问题。为此，人们也研发了多种廉价的高分辨制造技术，例如：(1)三维激光直写术(DLW)：目前它可以与全息光刻和三维电子束刻蚀术相媲美，但仍需改善激光稳定性、机械稳定性和掩模，特别是直写算法可以极大地提高纳米光刻的速度和性能，激光直写术已经使隐身技术推广到了可见光波段^[13]。最近，受激辐射损耗(STED)光刻术也成为激光直写术的方法之一，尺寸达65 nm，已经制造出真正的三维光子晶体带隙材料。目前的重点是研究适合三维激光直写的新型光致抗蚀剂材料，以期获得几纳米的特征尺寸；(2)纳米打印术(NIL)：它是一种廉价、大面积和并行的大规模制造技术，并且可以处理多层结构，目前已经实现工业化应用的是30 nm水平。图6为用纳米打印技术制作立体半球天线。最近的报道用纳米打印术制作的表面等离子体光子晶体使光提取效率提高了10倍^[14]。三维打印成型也在研究之中，关键问题是尺寸和成本。目前还在探索新型可打印功能性高分子聚合物材料，研究适合纳米打印术的工具和规范以及与自组装有关的问题等；(3)纳米粒子的自组装：

对于周期结构的制造，自组装技术或者自下往上(bottom-up)的纳米结构制造术提供了有别于自上往下(top-down)技术的另一种选择，如胶体方法可以实现平方厘米量级的无缺陷纳米球组装等。像DNA或蛋白连接的金属纳米粒子这类的自下往上技术已经成功地制造出二聚体(dimers)、三聚体(trimers)或更复杂的纳米颗粒低聚物(oligomer)^[15]。对于自组装技术来说，一个重要的挑战是量化：没有合适的方法和标准，工业界很难用它做大规模制造；另外，基于液体的处理工艺本身是不可靠的，需要进一步研究，特别是其中的对流力(convection forces)和表面能量等。

2.10 量身定制光学特性的纳米光子材料和器件

现在已经出现了多种具有不同寻常光学特性的新型纳米光子材料，如超强透射率的纳米孔阵列、完美吸收器、可开关可调谐的材料、超强非线性响应的介质、新颖的偏振元件甚至负折射材料等^[16]。下面选择几个与具体应用直接相关的例子做简单介绍：(1)红外宽光谱超材料：采用红外宽光谱超材料，利用激光直写技术和双光子聚合以及金电极技术，已经制造出三维超材料偏振器。当使用的超材料厚度为3.5—8 μm时，对左旋和右旋偏振光的选择透射率高于90%，而当超材料厚度只有几个微米时，透射率为10%。利用

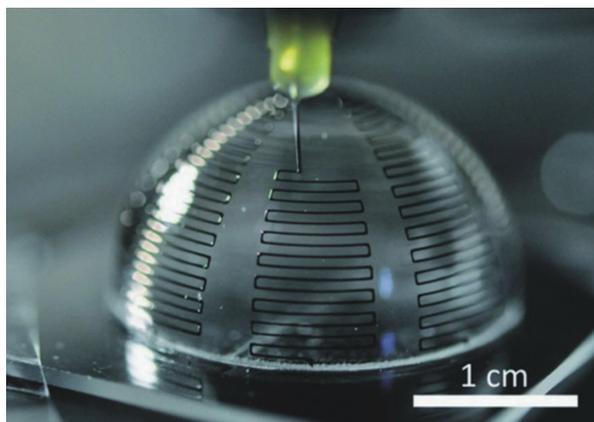


图6 纳米打印术制作立体半球天线(图片来自网络 <http://news.mydrivers.com/1/188/188950.htm>)

位相全息技术可望生产出厘米量级的超材料。(2) 红外吸收器^[12]: 使用 Si_3N_4 和铝, 可使红外吸收器调谐到 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 和 $8\text{--}12\mu\text{m}$ 谱段, 而且与CMOS技术完全兼容, 此外还可以用它作为传感器。(3) 非线性和光控类型的超材料: 高速、超快非线性和光控类型的超材料可用于全光数据处理线路。超材料层可以大大增强硅的超快非线性响应, 如镀在超材料上的单阱半导体碳纳米管实现了一个量级以上的高度非线性。“相变”材料主要用于光控类型的开关, 而硫化玻璃多年来已经用于可重写光盘技术, 其纳米级的超材料电光开关也已实验成功。用磁场控制铁电和贵金属多层结构的表面等离子体激元也可以用来实现超材料的调谐。(4) 纳米结构光学滤光片: 它在医学、显微术、遥感和遥测等领域有广泛的应用。周期性折射率或光子晶体纳米结构可以调整和控制透射和反射谱; 不同于传统的拜尔(Bayer)滤光方法, 通过组合多个不同周期槽面的重叠, 几乎可以控制每一种颜色的光, 全部颜色都可以由表面等离子体谐振来排序, 甚至单个纳米结构金属膜就可以实现细密的颜色选择。(5) 石墨光子学材料: 它可应用于超材料的电光响应控制盒探测器, 因为石墨具有新颖的光学和电子特性, 是透明导电膜的材料之一, 可以取代ITO和超薄金属膜, 已经用于太阳能器件和触摸屏。

值得一提的是, Science杂志2011年9月发表了哈佛大学的一篇研究论文, 文中报道了利用组成超材料的微纳天线阵列所产生的附加位相可以任意改变折射光的方向^[17]。

2.11 太赫兹技术领域

太赫兹技术领域虽然没有单独列在欧洲科学家的报告中, 但笔者认为, 这也是一个发展十分迅速而且有重要应用前景的领域^[18]。太赫兹技术是一个相对独立的领域(它包括辐射源、传输和探测系统), 但可以借鉴其他纳米光子技术的成功范例(即将尺寸放大), 同时太赫兹技术还可以通过自身的改进而应用于一些纳米光子学领域

(即尺寸缩小)。器件的典型尺寸从纳米到米的量级, 小到纳米碳管, 大到粒子加速器。正因为如此, 美国电气和电子工程师协会(IEEE)于2011年专门新出版了一本期刊IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 第一期已于2011年9月份出版。太赫兹技术应用领域包括军事、国防、安全、生物、化学、医疗诊断、成像、通信以及制造业的质量控制和过程检测等。研究范围包括太赫兹源(连续波和脉冲)、非线性效应、传输、检测、材料、与物质的相互作用、对人体健康的影响以及实际应用等。太赫兹技术有如此广泛的应用和研究领域, 主要归功于THz波段的电磁波有许多其他波段所不具备的特性, 例如它可以穿透许多光学不透明的物体, 光能量相对比较小(毫电子伏特量级), 辐射不产生电离, 对生物无害等。主要挑战是: (1) 太赫兹在大气中的吸收非常大, 大于 100 dB/km , 而可见光仅 0.021 dB/km , 因此其自由传播距离仅在厘米量级; (2) 传统的太赫兹测量技术只能获得前向传播信息, 不适合遥感、遥测等需要测量后向散射的情况; (3) 目前的太赫兹测量技术主要是采用电光晶体或电极, 因此基本上是“点”测量。目前太赫兹技术研究的重点是有源器件、波导类器件以及长作用距离探测器等方面。由于很多普通材料对太赫兹辐射没有可以利用的电磁反应, 超材料及其结构可能扮演重要角色。

根据以上所述, 纳米光子学中重点发展的主要器件和材料有光子晶体、金属纳米孔阵列、光子纳米天线、LED/OLED、太阳能器件、纳米集成光路、表面等离子体光子学、光纳米粒子、传感器、以及各种纳米材料和超材料等, 包括太赫兹领域内的相关器件。

3 结束语

纳米光学不仅涉及多学科理论, 例如光学、物理学、化学、半导体科学、电子学、材料科学和数学等, 同时还需要昂贵的制造设备和测量仪器等实验/检测手段的大量投入。我国在纳米光

学方面起步基本与国际同步,并且最近几年的经费投入增长幅度也非常大,先后成立了一些国家级、省部级、市级等重点实验室以及区域研究中心等,研究队伍不断壮大,研究面不断拓宽,有些研究达到领先水平,已经取得了一些令人瞩目的成果^[19-21]。依作者之见,要加快我国纳米光子学的应用研究和市场开发,减少一些不必要的重复性研究,应注意以下几个方面:(1)加强不同高等学校、科研院所之间以及不同地区、不同部门之间的合作,例如有“国家纳米技术基础研究网络(NNIN)”组织等,其会员单位可以无偿地使用计算资源,并有一些项目合作。虽然目前国内已经有类似的组织,但在资源和信息共享方面有待深入;(2)建立区域性的纳米加工中心,供周

围研究者免费使用或代为制造,例如加拿大有“国家研究院的光子学制造中心”,几个不同区域的纳米加工中心则每年举办为期不等(一周到一年)的设计、制造和测量研讨班;(3)共享测试设备,与其他研究相比,纳米光学原型试制加工和测量仪器设备昂贵,不同单位之间的设备共享可以使资源充分利用;(4)充分利用国际领先的优秀设计软件,加快设计进度和虚拟原型制造。由于试制和测试费用高、周期长,仿真计算是必不可少的重要一环,因此设计工具就是生产力。目前最普遍使用的时域有限差分(FDTD)方法直接求解矢量麦克斯韦方程,与其他方法相比,它具有宽光谱、适用性强、并行计算以及占用计算机资源相对较少等优点。

参考文献

[1] Editorial. Nature Photonics, 2011, 379: 5; Hulst N V, Kennedy S. Nanophotonics Forersight Report. Nanophotonics Europe Association, 2010

[2] Hennessy K, Badolato A, Winger M *et al.* Nature, 2007, 445: 896

[3] Giessen H, Lippitz M. Science, 2010, 329(599420): 910

[4] Wurtz G A, Pollard R, Hendren W *et al.* Nature Nanotech., 2011, 6: 107

[5] O'Connor D, Zayats A. Nature Nanotech., 2010, 5: 482

[6] Chen W, Bardhan R, Bartels M *et al.* Mol. Cancer Ther., 2010, 9(4): 1028

[7] Novotny L, van Hulst N F. Nature Photon., 2011, 5: 83

[8] Quidant R, Kreuzer M. Nature Nanotechnol., 2010, 5: 762

[9] Birtwell S W, Galitonov G S, Morgan H *et al.* Opt. Comm., 2008, 281(7): 1789

[10] Curto A G, Volpe G, Taminiau T H *et al.* Science, 2010, 329(5994): 930

[11] Atwater H A, Polman A. Nature Mat., 2010, 9: 205

[12] Liu N, Mesch M, Weiss T *et al.* Nano Lett., 2010, 10(7): 2342

[13] Ergin T, Stenfer N, Brenner P *et al.* Science, 2010, 328(5976): 337

[14] Reboud V, Kehagias N, Kehoe T *et al.* Microelec. Engineering, 2010, 87(5-8): 1367

[15] Hentschel M, Saliba M, Vogelgesang R *et al.* Nano Letters, 2010, 10(7): 2721

[16] Zheludev N I. Science, 2010, 328(5978): 582

[17] Yu N, Genevet P, Kats M A *et al.* Science, 2011, 334: 333

[18] Tonouchi M. Nature Photonics, 2007, 1: 97

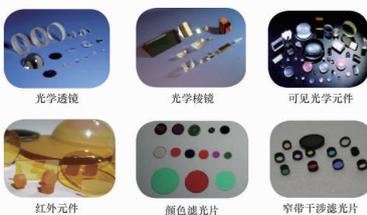
[19] 倪培根. 物理学报, 2010, 59(1): 340

[20] 顾本源. 物理, 2007, 36(4): 280

[21] 张俊喜, 张立德. 应用物理, 2011, 1(1): 9

标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片, 超过700个品种规格的透镜, 棱镜, 反射镜, 窗口, 滤光片等常用光学器件; 涵盖紫外, 可见, 近红外, 红外等光学应用领域。



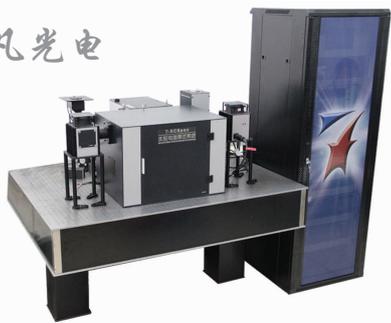
光学透镜 光学棱镜 可见光学元件

红外元件 颜色滤光片 窄带干涉滤光片

GW 北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216
邮箱: optics@goldway.com.cn

赛凡光电



多功能太阳能电池光谱性能测试系统