

对微纳光子学发展的一些战略思考

Strategical Thinking on Development of Micro- and Nano-Photonics

李淳飞

(哈尔滨工业大学 理学院 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Li Chunfei

(Department of Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

摘要 对比电子学和光子学的发展路线图, 提出光子学及其 2 个发展阶段——微光子学和纳光子学的定义, 并介绍它们的主要研究内容。指出微光子技术主要是“以电控光”的技术, 其关键器件是半导体激光器; 纳光子技术主要是“以光控光”的技术, 其关键器件是全光开关。

关键词 微米光子学; 纳米光子学; 半导体激光器; 全光开关

Abstract The photonics has two developing phases: microphotonics and nanophotonics. The definitions of them are point out, and their contents are introduced. The key devices for microphotonics are semiconductor lasers, which are controlling photons with electrons; the key devices for nanophotonics are all-optical switches, which are controlling photons with photons.

Key words microphotonics; nanophotonics; semiconductor lasers, all-optical switches

中图分类号 TN201 doi:10.3788/LOP20094610.0015

1 光子学的发展和内涵

1.1 电子学和光子学的发展路线图

电子学与光子学的发展过程有很大的相似性, 如图 1 所示。电磁学和光学出生于同一个学科——物理学; 两者先后产生电子学和光子学; 两者皆经历从微米尺度(宏观)向纳米尺度(介观)的发展过程: 即从微电子学到纳电子学和从微光子学到纳光子学的过程; 21 世纪以后两者将并驾齐驱, 最终实现电子器件与光子器件的共集成, 使人类进入纳米信息技术的新时代。

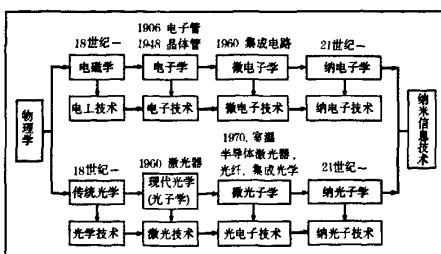


图 1 电子学和光子学发展的路线图比较

过去的 100 年中, 光子学的发展比电子学的发展慢得多, 主要原因有两个: 一是电子学的电源是相干的, 而光子学的相干光源(激光器)直至 20 世纪 60 年代才发明, 两者相差 200 年, 致使光子学的诞生比电子学的诞生迟了半个世纪; 二是电子学在 1948 年就发明晶体管, 而光子学发展至今还没有“光晶体管”。

电子学与光子学各有其优势和困难: 电子学能够进行数字化信息处理, 但不可能实现高带宽、高并行度的信息传输; 光子学的传输带宽很大, 但实现数字化信息处理十分困难。

存在这种差别的根本原因是电子和光子的特性不同: 电子带电, 光子不带电。电子之间可以通过电场相互关联, 因此能够通过晶体管直接实现以弱电信号控制强电信号。而光子不带电, 不可能直接实现“以光控光”, 只有通过非线性光学的方法, 以强光改变介质的光学性质来实现对弱信号光的控制, 因此很难实现以弱光控制强光的“光晶体管”。

1.2 光子学的定义和内涵

为区别建立在非相干光源基础上的传统光学, 人

们把以激光为光源的光学称为现代光学。激光是由状态相同的光子所组成,显示出激光的光子特性,因此现代光学的诞生就意味着光子学的诞生。从广义观点来看,光子学是研究光子的产生、传输以及与物质相互作用规律的科学。可以说,凡是与光子行为有关的学科,包括现代光学、微光子学(即光电子学)、纳光子学等都应该属于光子学的研究范畴。

激光产生后的10年间,现代光学的理论发展很快,迅速建立起激光物理学、非线性光学、信息光学和量子光学等分支学科。不过当时的激光技术还较多地使用尺寸较大的气体、固体、液体和化学激光器。半导体激光器只是在低温下运转不能实用。这个时期相当于电子学所处的真空管电子学阶段。

微电子学的诞生是从1960年发明半导体集成电路开始。现代的电子计算机就是建立在集成电路芯片的基础上。在集成电路中,电子器件的尺寸是微米量级的,故称微电子学。

与微电子学对应的光子学是微光子学,它是从1970年发明室温运转的半导体激光器、光纤以及其他集成光子器件以后发展起来的,这些器件是现代光纤通信的基础,其尺寸皆为微米数量级。在微米尺度范围,光子特性表现得更为明显。

随着21世纪科学的进步,微米尺寸的光子器件将会发展成为纳米尺寸的器件,从而形成纳光子学。从微米到纳米,不只是空间尺度在数量上的变化,其实是从“宏观”到“介观”的一次质的飞跃。

总之,现代光学就是光子学。微光子学和纳光子学分别是微米和纳米尺度的光子学,它们是光子学的两个发展阶段。

微光子学的研究对象属于宏观范围,其光场称为远场(即传播场);纳光子学的研究对象属于介观范围,其光场称为近场(即倏逝场)。从控光技术来看,微光子学是“以电控光”的光子学,或称为光电子学,其核心技术是半导体激光器及其应用技术。在微光子学阶段,不仅器件是光电混合的,应用系统也是光电混合的。例如光纤通信系统,光信号的干线传输已经是全光的,但是光信号的交换还是用电子技术。而纳光子学的发展方向是“以光控光”的光子学,其核心技术是全光开关器件及其应用技术。在纳光子学阶段,应用系统也将是全光的。例如全光通信的光交换器是由全光开关组成,光学数字计算机也是由全光开关组成的。微光子学与纳光子学的区别见表1。

1.3 光子技术的定义和内涵

光子技术可以定义为:“以光子作为信息与能量

的载体”的技术,主要包含信息光子技术与能量光子技术两部分。

表1 微光子学与纳光子学的特点比较

	微光子学	纳光子学
空间尺寸	1~1000 μm(宏观)	1~1000 nm(介观)
光场特性	远场(>衍射极限)	近场(<衍射极限)
电磁理论	标量理论	矢量理论
学科别名	光电子学	全光子学
控光方法	以电控光	以光控光
主要器件	半导体激光器	全光开关器件
主要系统	光通信:光子传输+电子交换	全光通信
	光计算:电子芯片+光子外设	全光计算机

信息光子技术是以光子为信息载体的技术,其研究内容包括光信息的产生、传输、处理、探测、显示、存储等。主要的技术有通信、计算、传感3个领域。

众所周知,信息技术是实现国民经济现代化的带头技术。信息技术的发展正经历着4个发展阶段,如表2所示。

表2 信息技术的4个发展阶段

发展阶段	起始年	工作方式	主要技术	主要系统
电子管 信息技术	1906	以电控电	电子管 分立电路	电话、电报、 无线电通信
微电子 信息技术	1948	以电控电	晶体管 集成电路	电子计算机、 电子通信、 互联网
微光子 信息技术	1970	以电控光	半导体激光器 光纤技术	光纤通信、 微机、手机
纳光子 信息技术	20xx	以光控光	全光开关 集成光路	光计算机、 全光通信

在信息技术的不同发展阶段,信息的控制方式有不同特点:在电子信息技术阶段(包括电子管信息技术和微电子信息技术阶段),是以电控制电;在微光子信息技术阶段(或光电子信息技术阶段),是以电控制光;在纳光子信息技术阶段,则是以光控制光。

现在人类还处在微光子(或光电子)信息技术阶段。在信息技术的通信、计算、传感3个主要领域中,其功能单元和主要部件都是光子技术和电子技术的混合,见表3。

能源光子技术是以光子为能量载体的技术。实质上是将光子能量与其他各种能量进行相互转换的技术,包括光能→热能、电能、热核能、化学能、生物能等的转换,以及电能→光能的转换。这些转换过程牵涉各种技术。

表 3 光电子信息技术的光电混合特点

信息领域	功能单元	主要部件	技术种类
通信	信号传输	DWDM 光纤 通信系统	光子技术
	信号交换	电子交换器	电子技术
计算	计算机 CPU	硅电子芯片	电子技术
	计算机外设	光盘、显示器、 输出/输入	光子技术
传感	传感元件	光纤传感器、 光纤网络	光子技术
	信息处理	解调器、电子开关	电子技术

2 微光子学技术

微光子学从 1970 年起发展至今, 已近 40 年。目前信息微光子技术的核心技术是光纤通信, 而能量微光子技术的热点技术有半导体光照明、太阳电池等。

2.1 信息微光子技术的关键——光纤通信技术

光纤通信技术的重要性表现在:

1) 光纤通信以其高带宽和波分复用并行处理技术而大大优越于电子通信。由于掺饵光纤放大器(EDFA)和密集波分复用器(DWDM)的发明, 使光通信实现了“全光传输”;

2) 光纤通信的器件技术, 如有源器件、无源器件以及光纤、光缆等已经被广泛应用于其他技术, 如光纤传感技术、生物、医学光子技术、军用光子技术等;

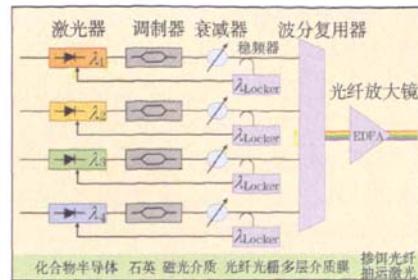
3) 光纤通信的系统技术也已经用于巨型计算机和光纤传感网络等;

4) 光纤通信的发展前景是光网技术。现在只剩下解决“最后 1 公里”的问题。“光纤到户”的普及是当前的迫切任务。

光纤到户的主要困难是成本问题。为什么光纤通信的成本会那么高? 因为元器件的价格太高。根本原因是光通信器件的材料不统一, 因此不能像电子技术那样实现集成化和自动化。

光纤通信元器件材料不统一的情况, 只要看看信号发射机部分就可见一般了, 如图 2 所示。激光器是化合物半导体材料, 调制器是石英材料, 衰减器是磁光材料, 稳频器是石英光纤, 波分复用器是多层介质膜, 光纤放大器是掺铒光纤加抽运激光器等。

为实现器件材料的统一, 人们正研究在石英基底上实现光子-电子共集成。主要困难是: 硅是间接带隙半导体材料而不能发光; 石英非线性太弱不易做全光开关。这两个困难在纳米光子学条件下都有可能解决, 如可采取纳米硅晶发光, 可采用微环谐振器做低功耗全光开关。

**图 2 光纤通信发射端的光子器件由不同材料构成**

光纤通信的进一步发展是实现全光通信, 如今的电子交换机需要换成光子交换机, 这样光信号的交换可以不经过光电转换直接在光域中完成, 因此全光开关器件的研究至关重要。但是低功耗、高速的全光开关只有在纳光学和飞秒激光技术的条件下才能实现。

2.2 能源微光子技术的热点——光照明、太阳电池

2.2.1 半导体光照明

人类经历过两次照明革命。第一次是 20 世纪从火到白炽灯和荧光灯的革命, 第二次是 21 世纪使用半导体光源(LED)的革命。LED 光源的优点是:

1) 高效节能: 可以减少全球照明用电的 50% 和总耗电的 10%;

2) 降低成本: 节约灯、灯具、电费的开支达到每年 2500 亿美元;

3) 绿色环保: 可以减少 CO₂ 和 SO₂ 的排放量达到 3.5 万吨;

4) 长寿命: LED 光源比白炽灯寿命长 100 倍; 比荧光灯长 5 倍。

将 LED 与传统电光源的发光效率和使用寿命比较, 大功率的白炽灯、荧光灯和白光 LED 的发光效率分别是 15, 70~100, 200 lm/V; 寿命分别是 1, 20, 大于 100 kW·h。

由于半导体光照明的重要性, 世界发达国家都纷纷制定国家发展规划, 注入重金开发这项技术。如美国的“下一代照明光源计划”、日本的“21 世纪光计划”、欧共体的“彩虹计划”等, 我国也提出了“国家半导体照明工程计划”。

2.2.2 半导体太阳电池

当今世界能源紧张, 而太阳能的储量大得惊人, 地球表面每年接收到的太阳辐射能量高达 1.8 × 10¹⁸ kW·h。太阳是人类可以利用的最丰富的能源, 而且是一种最洁净的能源, 不存在运输问题, 可以就地开发。

利用太阳能的主要物理效应是光伏效应, 而半导体 p-n 结器件的光电转换效率最高, 因此称这类光伏

器件为太阳电池。太阳电池按材料分类有多晶、单晶硅太阳电池；硫化镉、硒铟铜、碲化镉、砷化镓、磷化铟化合物太阳电池；有机薄膜太阳电池等^[1]。太阳电池产品的年增长率达到 50%。现在光伏发电提供的电能约占全球电能的 2%，预计 2040 年达到 21%~26%。电池的效率已发展到较高水平，其中单晶硅电池的效率约 25%，多晶硅电池的效率约 20%。目前正在研究的纳米太阳电池有量子阱纳米硅电池和二氧化钛电池等，具有效率高（可达 80%）和成本低的优点。

3 纳光子学技术

纳光子技术的研究内容包括纳米测量、纳米材料、纳米器件、纳米加工等。

3.1 近场光学的测量技术

一般是通过纳米探针将纳米结构的近场信息转化为远场（传播场）信息的方法来实现对纳米结构的测量。纳米探针有两种：空心的光纤探针和实心的金属探针，如图 3 所示^[2]。

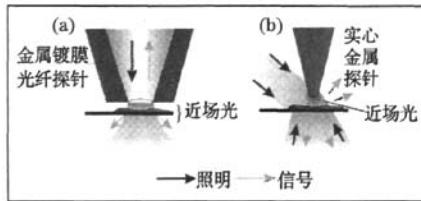


图 3 两种纳米探针。(a)空心光纤探针;(b)实心金属探针

基于纳米探针的纳米测量仪器有近场光学显微镜和近场光学时间分辨光谱仪等。图 4 给出扫描近场光学显微镜的工作原理图^[2]。图 5 给出 1 nm 油滴的近场照片和远场照片比较。

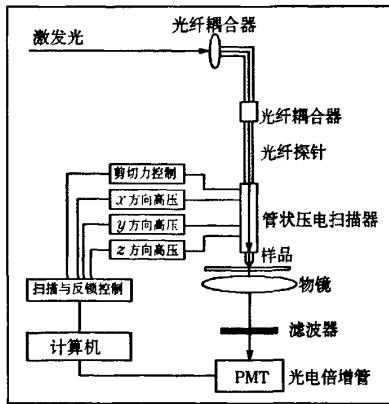


图 4 扫描近场光学显微镜的工作原理图

3.2 纳米材料与器件

纳米材料的研究先从具有周期结构的无机纳米材料开始，主要有半导体量子限制材料、电介质光子晶体材料、金属膜等离子激元材料等。此外还有纳米

复合材料、有机化学纳米材料以及生物纳米材料等。

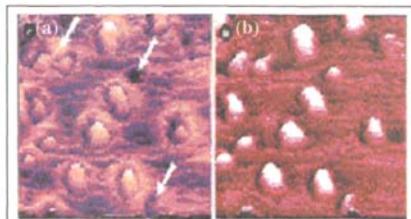


图 5 1 nm 油滴的远场(a)和近场(b)照片

3.2.1 量子限制材料与器件

量子限制是由具有不同禁带宽度的两种半导体材料交替生长而成。有量子阱、量子线和量子点，分别在一维、二维、三维方向上限制载流子的运动，如图 6 所示。

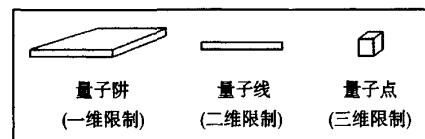


图 6 量子阱、量子线和量子点材料的量子限制作用

沿晶体生长方向周期性地生长多个量子阱，形成的 InGaAs/GaAs 多量子阱（MQW），如图 7 所示。其中 GaAs 和 InGaAs 具有不同的禁带宽度，分别形成势阱和势垒。电子、空穴被束缚在势阱中。

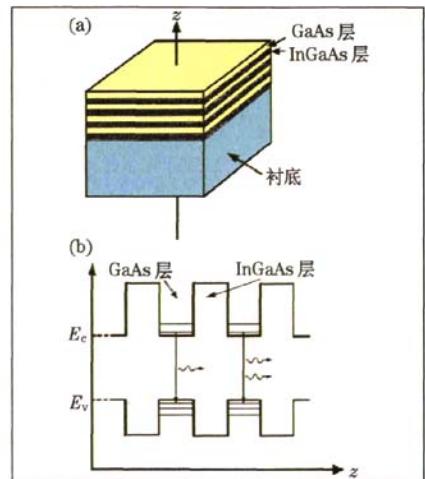


图 7 (a)InGaAs/GaAs 多量子阱结构;(b)能级结构图

用此 InGaAs/GaAs 多量子阱为有源层制成的垂直腔表面发射激光器的结构如图 8 所示^[2]。其中一对 GaAs/AlAs 分布反馈布拉格反射镜（DBR）组成光学谐振腔。通过电极注入电流，激发出激光，从垂直输出孔输出。

图 9 给出 ZnO 量子线激光器的一个例子。ZnO 量子线具有六角形截面，长 2~10 μm，直径 20~150 nm，

在光激发下的受激辐射光沿中心轴的端口射出,波长为385 nm^[1]。

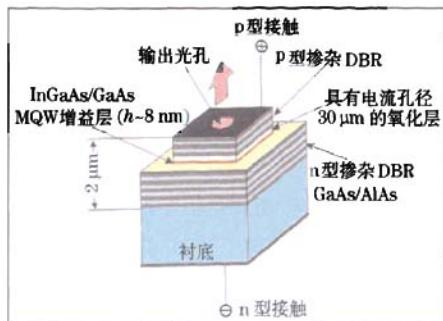


图 8 InGaAs/GaAs 多量子阱垂直腔表面发射激光器结构图

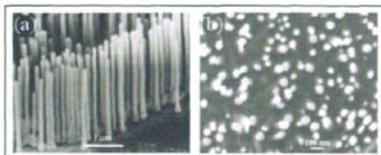


图 9 (a)ZnO 量子线;(b)六角形端面图

图 10 给出制备 InP 量子点激光器的例子。先将 GaAs 刻蚀成锥形,再在顶部外延生长 InP 形成量子点,得到光致激光辐射,波长 877 nm^[1]。

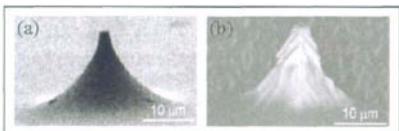


图 10 在锥形 GaAs(a)的顶部外延 InP(b)形成 InP 量子点激光器

3.2.2 光子晶体材料与器件

光子晶体是由两种不同折射率的材料周期性交叠而成,有一维、二维和三维结构。一维的层状结构如同布拉格光栅;二维的有空气隙的圆柱体结构有如光子晶体光纤;三维是由球形颗粒组成的蛋白石结构,如图 11 所示。

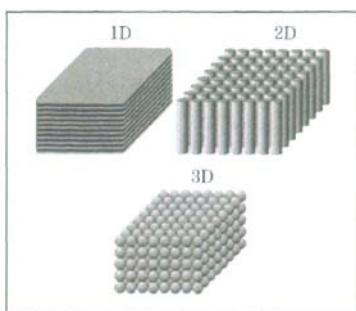


图 11 光子晶体的一维,二维和三维结构

由 Maxwell 方程确定的光子晶体的色散关系(ω -

k 关系)与半导体由薛定谔方程所确定的色散关系($E-k$ 关系)类似,也具有带隙结构,处于光子带隙内频率的光子会被光子晶体全反射。一维、二维和三维光子晶体对光子传播受限制的方向不同,类似于量子限制效应,如图 12 所示^[2]。

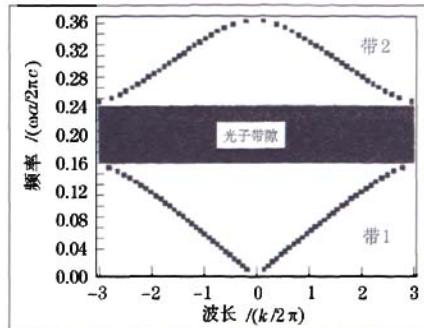


图 12 光子晶体的色散关系 (ω - k 关系)

若在光子晶体中引入缺陷,会在禁带中产生一个缺陷态如图 13 所示^[2]。具有缺陷态频率的光子将会局限在缺陷的位置不被快速衰减。

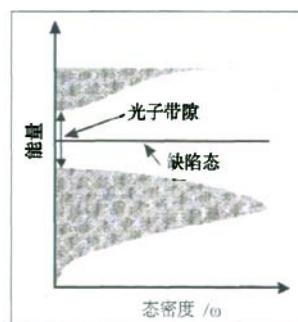


图 13 光子带隙中的缺陷态

光子晶体中存在着两种缺陷:线状缺陷,光只能沿线缺陷的方向传播,起着光波导的作用;点状缺陷,光被封闭在一个全反射墙中,等价于一个微腔,如图 14 所示^[1]。

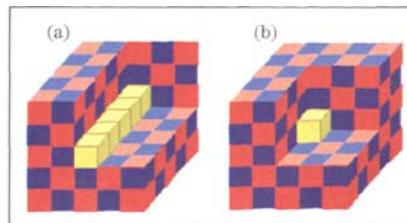


图 14 光子晶体的两种缺陷。(a)线缺陷;(b)点缺陷

光子晶体光纤和光子晶体波导器件正是利用了光子晶体的缺陷机制。图 15 给出了光子晶体光纤的两种基本结构:基于带隙缺陷原理的空心光子晶体光纤和基于全反射原理的实心光子晶体光纤^[1]。

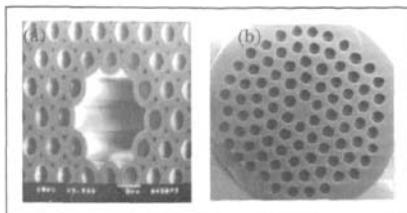


图 15 两种光子晶体光纤。
(a)空心光子晶体光纤;
(b)实心光子晶体光纤

图 16 给出一个光子晶体全光开关的原理图。这是在波导 M-Z 干涉仪上加量子点相移器的触发开关。开关能量小于 1 pJ, 开关时间短于皮秒^[3]。

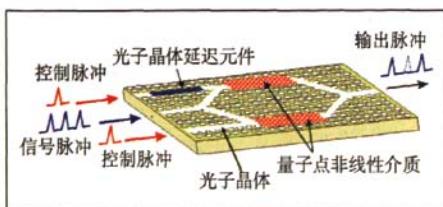


图 16 光子晶体/量子点 M-Z 全光开关原理

3.2.3 表面等离子体激元材料与器件

表面等离子体激元(Surface Plasmons, SP)效应可由以下实验得到,见图 17。在一块玻璃棱镜上先镀上一层金属膜(如 Ag),再覆盖一层电介质膜(如 SiO₂ 或 PMMA),将 P 偏振光入射棱镜。改变入射角测量反射光,在一特殊的 θ 角下可以获得最大的光吸收,这是金属-电介质界面产生电磁场共振引起的吸收。因为金属具有负折射率,在光激发下在界面处出现表面电荷(自由电子)密度的周期性分布,引起电磁场的强

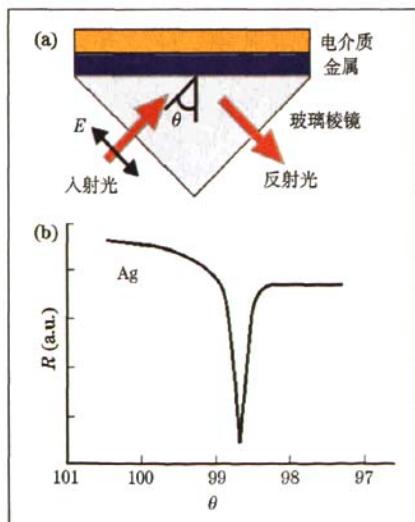


图 17 (a) 产生表面等离子体激元的实验装置;(b)反射率-角度曲线

共振,即所谓表面等离子体激元效应。对光频波、金属 Au, Ag, Al, Cu 等产生的 SP 效应较强。

在光的激发下,在金属-电介质的界面上产生 SP 效应的同时,光场与电磁场共振耦合,还会在界面中产生倏逝场,该场在金属-电介质的界面内传播,但在界面的垂直方向的电介质和金属内倏逝场呈指数衰减。这种光波的量子化称为等离子体激元极化子(Surface Plasmons Polaritons,SPP),如图 18^[4]可见,在二维界面内传播的 SPP 波是它的磁场分量,它平行于界面,垂直于传播方向;SPP 波的两个电场分量组成的面与界面垂直。垂直于界面的电场分量渗透电介质的距离为 100 nm,渗透金属的距离为 10 nm。

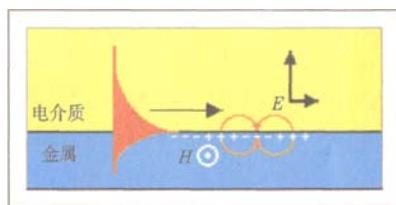


图 18 等离子体激元极化子波示意图

利用 SPP 波的这些特性,可以制造纳米尺寸的光波导及各种光子器件,如光耦合器、M-Z 干涉仪和高灵敏度的传感器等。扫描近场光学显微镜的纳米金属探针就是利用了 SPP 效应。将金属薄膜与增益材料和非线性材料相结合,还能做有源器件和全光开关。

将纳米光栅做在金属-电介质的边界上,可以定向地激发 SPP;反过来,利用光栅的散射作用,可将 SPP 波转化为向外传输的光,如图 19 所示,图中的电介质为空气^[4]。

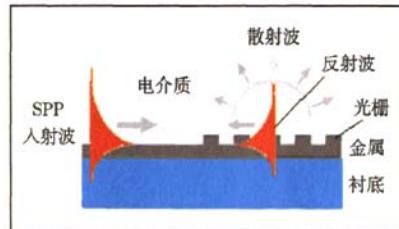


图 19 金属光栅对 SPP 波的散射和反射作用

SP 效应可以应用于增强 LED 的发光效率。例如在 InGaN/GaN 量子阱材料的绿光 LED 的表面做一个银的光栅(周期 500 nm, 槽深 30 nm), 可加强 InGaN/GaN 与 SP 电磁场的耦合,使光辐射加强,发光效率提高近 60%。

研究表明,金属实心或空心的颗粒在光的激发下会吸收光,而且吸收光谱与颗粒的直径有关。如果在太阳电池材料表面涂上一层适当尺寸的纳米金属颗

粒(如Ag),或做一个光栅与DBR反射器等纳米结构,可以使器件对特定谱宽的光的吸收能力提高约2~3倍。

图20给出了一个基于SP原理的全光开关原理图^[5]。在衬底上镀有金属膜(Ag),并刻蚀了一块光栅,其上做一层非线性膜。在抽运光的作用下,非线性材料的折射率发生变化,使信号光从不透射变成透射;见图20(a);光场分布图的数值模拟结果见图20(b)。

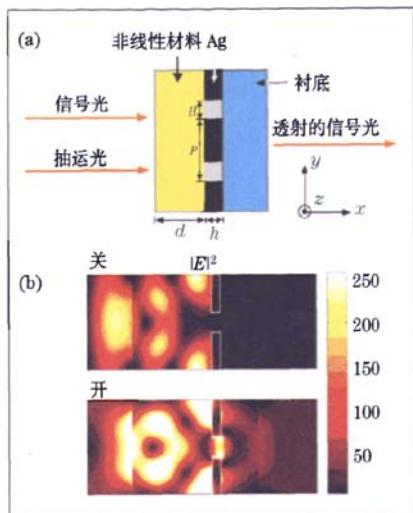


图20 基于SP效应的全光开关原理。(a)器件结构图;
(b)数值模拟光场分布

4 发展我国微纳光子学的战略措施

与国际上科技发达的国家相比,目前我国微纳光子学的研究还不算落后,这从我国在微纳光子学领域发表的论文数量和投稿的杂志级别就可看出。但是我国的光子学研究论文大部分是理论方面的,并且大多数是跟踪国外的。由于国内缺乏先进的科学实验平台,特别是缺乏制备微纳光子学材料和器件的工艺条

件,实验方面的论文比较少(除了少数与国外合作研究的论文),创新的思想无法得到自己的实验验证。微光子学方面的情况尚且如此,在纳光子学方面,由于对仪器、设备、工艺和技术的要求更高,与国外的差距正在加大。

在光电子技术方面,国际经济的全球化和我国的改革开放形势,吸引着跨国公司将制造、加工基地向我国转移,21世纪初光电子企业的大公司纷纷落户我国。而且大量资金投向我国沿海经济发达地区(如广东、上海和京津地区),建立起一大批中外合资或独资企业。但是这些国外企业或技术人员,控制着产业的高端技术,对我国实行技术垄断,使我国的光电子技术至今还处于“下游”,成为外向加工企业。大多数光电子企业采用这样的生产模式:购买国外的芯片进行器件封装,或者购买国外的器件进行系统组装。目前我国光电子企业严重缺乏核心技术和自主知识产权,无法抵御国际经济危机,面临着很大的风险。

为了加快我国的微纳光子学与相关光子技术的发展,我国应该集中投入一部分资金,凝聚一批高水平研究人才,在某些光电子企业集中的地区,依托光子学研究有实力的单位,采用先进的管理模式,建设我国的先进的微米、纳米加工制造中心和微米、纳米光子学实验研究平台,开放为广大高校、研究所和企业的研究人员服务。只有这样才有可能在最短的时间内,使我国的光子学、光子技术以及光电子产业实现跨越式的发展,赶超国际先进水平,为我国的经济建设做出重大贡献。

收稿日期:2009-08-20

作者简介:李淳飞,男,教授,博士生导师,主要研究方向为非线性光学,光子器件等。

E-mail: cfli@hit.edu.cn

— | 参考文献 | —

- 1 刘颂豪,李淳飞.光子学技术和应用[M].广州:广东科技出版社,2006
- 2 Paras N. Prasad. Nanophotonics[M]. U. S.: John Wiley & Sons, 2004
- 3 K. Tajima. All-optical switch with switch-off time unrestricted by carrier lifetime [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, 32: L1746~L1749
- 4 M. L. Brongersma, P. G. Kik. Surface Plasmon Nanophotonics[M]. Berlin: Springer, 2007
- 5 Changjun Mini et al.. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(8): 869~871

对微纳光子学发展的一些战略思考

作者: 李淳飞
作者单位: 哈尔滨工业大学, 理学院物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001
刊名: 激光与光电子学进展 **[ISTIC PKU]**
英文刊名: LASER & OPTOELECTRONICS PROGRESS
年, 卷(期): 2009, 46(10)
引用次数: 0次

参考文献(5条)

1. 刘颂豪, 李淳飞. 光子学技术和应用 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2006
2. Paras N. Prasad. Nanophotonics [M]. U. S. : John Wiley & Sons, 2004
3. K. Tajima. All-optical switch with switch-off tilde unrestricted by carrier lifetime [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32:L1746~L1749
4. M. L. Brongersma, P. G. Kik. Surface Plasmon Nanophotonics [M]. Berlin: Springer, 2007
5. Changjun Mini et al.. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials [J], Opt. Lett., 2008, 33(8):869~871

相似文献(0条)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jgygdzxjz200910003.aspx

下载时间: 2010年2月22日