

# 纳米光子学的最新进展\*

明海<sup>†</sup> 陈博 李晴 唐麟 王沛

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

**摘要** 论述了纳米光子学的最新进展,介绍了国际上的一些研究小组所做的关于纳米光子学的实验,包括纳米开关、近场光学探针技术、近场光化学气相沉积制备、基于等离子体激元波导实现的远近场能量的转换装置等内容,着重阐明实验原理和纳米制备技术中的一些关键问题。

**关键词** 纳米光子学,近场,量子点,纳米开关

## Latest developments in nanophotonics

MING Hai<sup>†</sup> CHEN Bo LI Qing TANG Lin WANG Pei

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** Recent progress in nanophotonics including experiments on nanophotonic switches, optical near-field probes, the fabrication of nanophotonic devices by optical near-field chemical vapor deposition, nanometer-scale energy transition terminals between the optical far field and near field based on the plasmon waveguide, and so forth. The principle of the experiments and key problems in nanophotonic fabrication are discussed in particular.

**Key words** nanophotonics, near field, quantum dot, nano-switch

## 1 引言

随着人类社会进入 21 世纪,人类对信息的需求越来越多,对信息的传输、处理和存储提出了越来越高的要求。随着光通信、光计算等大容量高速信息处理的发展,信息传输中需求的通道数也越来越多(通道数从目前的  $8 \times 8$  到未来的  $10^3 \times 10^3$ ),存储密度越来越大(从  $\text{Gbit}/\text{in}^2$  到  $\text{Tbit}/\text{in}^2$ ,是目前 DVD 存储密度的 100 倍),处理速度越来越快(从  $\text{Gbit}/\text{s}$  到  $\text{Tbit}/\text{s}$ )。因此,要求元器件的尺寸越来越小,最终突破衍射极限的尺寸,器件的空间距离也越来越小(小于  $100\text{nm}$ )。图 1 给出了纳米光子学和传统光学的比较以及在未来应用中纳米光子学的优势。为了实现上述目标,Ohtsu 提出了一种全新的技术——纳米光子学<sup>[1]</sup>。纳米光子学(nanophotonics)指

的是利用光学近场作为信号载体,纳米粒子作为器件材料的基本单元进行制造和运作系统的技术,是对近场光学(near-field-optics)应用方面的一种发展。理论分析显示,现在的微机电光学系统的开关时间为  $\mu\text{s}$  量级,所需的驱动能量为  $10^{-17}$ — $10^{-18}\text{J}$ ,而同样的开关系统如果用纳米光子技术实现,其开关时间可以短至  $100\text{ps}$ ,所需的能量可以小到一个光子的能量。

纳米光子学的主要优点是它能在局域电磁相互作用的基础上实现许多全新的功能。在纳米光子学中,传统的干涉、衍射的概念不再适用,取而代之的是一些全新的概念。量子理论证明,通过一定的布局,纳米开关的实现是完全可行的。在近场条件下,

\* 国家自然科学基金(批准号 90206002)资助项目

2004-03-04 收到初稿 2004-03-23 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: minghai@ustc.edu.cn

单元器件的大小为几十纳米量级,相应能量传输所需的时间是几十皮秒,这些参数指标对比于目前的电子集成技术来说无疑是个飞跃.自1999年以来,基于表面等离子体激元,近场光学的纳米光子器件集成技术得到了飞速的发展.日、美、法、德等发达国家先后投入了巨大人力、财力来研究该前沿课题,以实现21世纪信息时代的“3T目标”(传输速度达到1Tbit/s,计算速度达到1Tbit/s,存储密度达到1Tbit/in<sup>2</sup>).

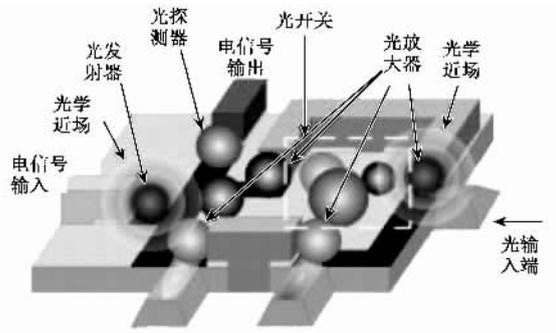


图2 纳米集成光路单元

各个量子点的初始能级、尺寸、相互间距、周边环境的温度,选择合适的近场光源,就可以实现高效率的能量传输.

依据量子理论,可以推导出共振能级公式.对于某一个单独的晶体量子点,其能量本征值可以用  $(n_x, n_y, n_z)$  描述.不同量子点的不同状态之间若满足下述关系式,则称之为共振态:

$$E_{n_x n_y n_z} = E_B + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2M(L - \alpha_B)^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2), \quad (2)$$

式中  $L$  为量子点的尺寸,  $\alpha_B$  为玻尔半径,  $E_B$  为玻尔初始能,  $M$  为量子点质量,  $n_x, n_y, n_z$  为整数.考虑量子点之间的能量转移原则:在单个量子点中,高能态可以跃迁到低能态上,释放  $h\nu$  的能量;在不同量子点共振态之间,由(1)式可知,能量将在共振态之间随机分布,两个态平均各占50%.但是有些态并不是稳定态,它们还会产生向低能级的跃迁,从而引起能量的转移.

由上述共振态能级表达式可知,尺度为  $a$  的量子点  $(1, 1, 1)$  态,  $\sqrt{2}a$  的  $(2, 1, 1)$  态,  $2a$  的  $(2, 2, 2)$  态为共振态;  $\sqrt{2}a$  的  $(1, 1, 1)$  态与  $2a$  的  $(2, 1, 1)$  态也是共振态.如图3和图4所示,其中 QD-I, QD-O 和 QD-C 分别代表输入、输出和控制量子点.当开关处于“关”状态,输入信号使 QD-I 跃迁到  $(1, 1, 1)$  态,与 QD-O 的  $(2, 1, 1)$  态发生谐振,能量在这两个态之间的分布各占50%.但是 QD-O 的  $(2, 1, 1)$  态不是稳定态,还要再跃迁到 QD-O 的  $(1, 1, 1)$  态,此时 QD-O 的  $(2, 1, 1)$  态和 QD-I 的  $(1, 1, 1)$  态仍然满足能量各占50%的要求,于是就实现了能量畅通无阻的单向传递.然后,同样的道理,能量单向传输到 QD-C  $(1, 1, 1)$  输出端, QD-O 无能量输出, QD-C 端输出能量.当开关处于“开”状态时,先从外界同时输入“输入信号(input)”和“控制信号(output)”,输入信号

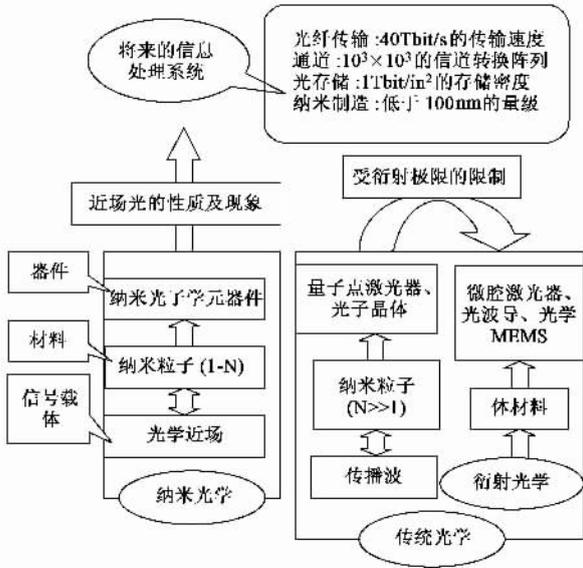


图1 纳米光子学与传统光学的比较

## 2 纳米开关

典型的近场光学系统是一个由宏观系统(包括衬底、入射光等)联结的微观系统(量子点和光学近场),如图2所示.利用量子理论能够证明:近场中能量只在两相邻的且具有共振能级的量子点之间才可以传播.考虑在近场情况下两个量子点之间的能量传输过程,简化模型如图3所示.利用量子力学理论,可以得到处于激发态 QDI, QDO 的几率为

$$\begin{aligned} \phi_1 |\hat{\rho}(t)|\phi_1 &= \cos^2(Ut), \\ \phi_2 |\hat{\rho}(t)|\phi_2 &= \sin^2(Ut). \end{aligned} \quad (1)$$

上式表明,在量子点之间包含随时间演化的过程.此过程只能在共振能态(flopping frequency)之间发生.通过这种方式,能量就可以由一个量子点传播到与其相邻的另一量子点上.

Ohtsu M 小组在研究中发现近场相互作用需要一定的条件,他们得出的结论是:只要控制初始体系

即使 QD-I 受激辐射,控制信号使 QD-C 处于饱和的基态  $(1,1,1)$ ,这使得 QD-O 不能向 QD-C 传输能量,于是从 QD-O 的  $(2,1,1)$  态向  $(1,1,1)$  态跃迁过程中输出光信号。

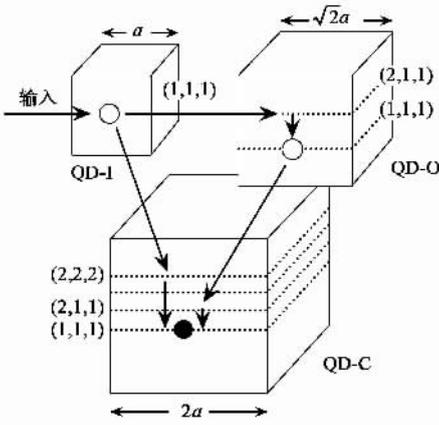


图3 开关处于“关”状态示意图( $a$ 为量子点的最小尺度,QD-I为输入量子点,QD-O为输出量子点,QD-C为控制量子点)

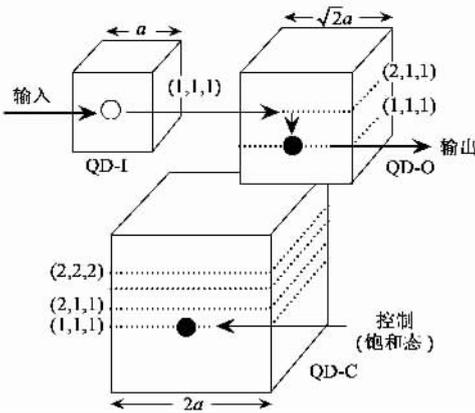


图4 开关处于“开”状态示意图

在实验中,传播所用的延迟时间由量子点之间的近场相互作用的强度以及近场与热池的相互耦合强度决定)。近场相互作用越强,延迟时间越短。整个开关的尺寸可以限制在 20nm 之内,开关的频率可以达到几百个 MHz。其性能将比传统开关优越几十倍。实验证明,在外界温度为 15K 时,激光信号源向输入量子点输入波长为 379.5nm 的激光,从控制量子点输入 385nm 的激光,实验中量子点的尺度在 20nm 左右。在“开”状态,QD-O 处发出 383nm 波长的信号光(QD-C 没有激光输出);在“关”状态时,QD-C 处输出 383nm 波长的信号光(QD-O 处没有激光输出)。

根据类似的量子调控,就可以实现纳米光子逻辑门。

辑门。

### 3 近场光学探针技术

光学探针可以检测光学近场,是近场光学显微镜等仪器的主要部件,因此在纳米光子学的发展中,探针是一个重要纳米光子学元件。

在纳米光子学中,一个合适的近场金属光学探针必须满足 3 个条件<sup>[1]</sup>:

(1)可以传导等离子体表面激元。因为远、近场光能的转换是纳米光子学要处理的一个重要问题,这个过程中需要将远场光先转化为等离子体表面激元,再进一步转化为近场光。因此作为探针,必须可以传导这种中间过程的波。

(2)能量有高透过率,即要求能量转换效率较高。

(3)经探针传导后,波的半波宽度较小。因为限定在一定的半波宽度范围内才可以适应光学近场的要求。

为了满足以上三个要求,在研究纳米光子学的过程中,研究者对传统的探针进行了改进,通过对材料、形状等参数的选择,用实验实现了能基本满足上述要求的探针。

实验中,首先要在传统的 Si 光纤探针表面镀一层金属薄膜,即实现金属-非金属的夹层结构。这时,一方面可以利用传统的非金属的光纤探针(Si)的高透过率,另一方面在介质夹层中可以实现等离子体表面激元的传导。对于金属薄膜厚度的选择,也可以从实验确定出来。通过改变金属薄膜的厚度,检测透过探针的光强,可以发现,金属薄膜最佳的厚度为 20nm。同时,选择不同形状的探针(如三角锥、金字塔锥探针等)进行测量,从能量透过率、能量转化效率、半波宽度等参数的结果比较可以看出,金字塔状的探针有最佳的效果。实验中能满足要求的最合适的改进型探针如图 5 所示<sup>[1]</sup>。

这种新型的探针可以产生和检测光学近场,以反映出尺寸超过衍射极限的信息,这也为实现高密

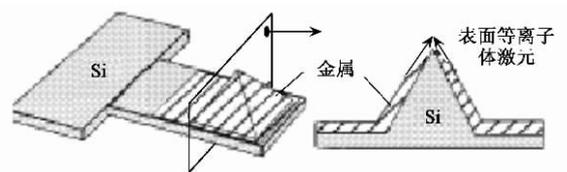


图5 改进型探针(金属-非金属夹层结构金字塔状探针结构,基底为硅)

度光学存储提供了可能性<sup>[2]</sup>。同时利用探针阵列并行读写(它是相对于传统的计算机串行读写而言的,串行读写只能读入一个 bit,而并行读写可以一次读入多个 bit),可以实现高速光学存储<sup>[3]</sup>。利用形状不对称的探针可以实现近场光的高效激发。

为了提高近场光的激发效率,即为了使激发光强提高,减少探针上由于近场能量的传播所引起的损耗,需要再继续缩小探针的尺度。另一种方法是高效率地激发  $HE_{11}$  模,破坏原来的针形结构,由此可以提高由光纤中的传播模式转变为  $HE_{11}$  模式的能力。

$HE_{11}$  模高效激发的实现是由于探针空间结构的不连续分布所造成的。在不对称结构探针的底部有一尖锐的边,在这里,可以转变成  $HE_{11}$  模,并且  $HE_{11}$  模的激发依赖于入射光的偏振方向。通过实验可以验证  $HE_{11}$  模可以由不对称结构的探针高效率地激发。它比对称结构的探针的激发强度提高了 10 倍左右,因此也可以提高扫描速度。

#### 4 近场光化学气相沉积制备<sup>[9]</sup>

远场光学中着重研究干涉和衍射,纳米光子学则更加注重发展纳米制造技术。由于纳米器件的尺度在波长的量级,甚至小于波长,纳米器件制造中对尺度和位置要求极为严格。选择合理的有较强适应性的纳米制造技术,是实现纳米级光学器件的前提。

自组织生长技术已经应用于纳米器件的制作<sup>[4]</sup>,但是这种方法的空间分辨率不够高。若用扫描探针显微镜如 STM,则可以有很高的空间分辨率,但是这种方法只能用于导体和半导体。传统的光学化学气相沉积的方法,利用远场光使有机金属化合物进行光化学反应,当提供的远场光能量合适时,可以沉积出约 100nm 的颗粒。这种方法适用于金属、半导体及绝缘体,但是对于更小尺寸的颗粒,则不能沉积,而且对于小尺寸的颗粒也不能对其位置进行精确控制。由于纳米光子学对空间分辨率的高度要求,因此研究者改进了这项技术,发展出一种新的纳米制造技术——光学近场的化学气相沉积法。用这种沉积法,可以同时保证精确地控制沉积颗粒的位置和大小。

和传统的化学气相沉积方法一样,光学近场的化学气相沉积(NFO-CVD)方法利用光解有机金属化合物沉积出纳米颗粒,但是将远场光改用近场光,利用近场光可以分辨尺寸小于衍射极限的颗粒的信

息,即可以沉积出波长小于衍射极限的物质。

利用近场光光解二乙基锌(DEZn),选择波长,在探针的尖端处形成近场,其他地方为远场。当激发波长太长时,由于能量过低,不足以析出 Zn,近场和远场都不能沉积出来 Zn 颗粒,必须选择合适的波长才能沉积。因此将探针尖端做到很窄的直径宽度,通过实验发现选用  $\lambda = 244\text{nm}$  的激光器可以避免远场光干扰,形成光学近场,可以实现对沉积出的 Zn 颗粒的位置和大小精确控制,沉积出来的 Zn 的大小约为 50nm。

#### 5 基于等离子体波导实现的远场能量的转换装置

为了能较好地激发和传导等离子体激元,等离子体波导通常是一种结构呈楔形的波导<sup>[5,6]</sup>。利用这种装置能够实现远近场光的转换。同时,利用近场光学显微镜还可以对转换后的情况进行观察、测量。

为了能够有效地连接远、近场两种不同尺度的元器件,对其转换装置可以考虑采用一种具有“逐渐细化”结构的波导来进行转换。根据远近场光的不同性质,此转换装置必须达到以下三点要求,即:高转换效率;小宽度波导(小于 100nm),以便实现光学近场和纳米量子点的有效耦合;大于波长的传播长度,以免远场和近场直接耦合<sup>[7,8]</sup>。

但是, TM 模的等离子体激元模式不易被远场光直接激发,这主要是由于激发模式之间的不匹配问题造成的。为了克服这个困难,将采用楔形结构的波导,如图 6 所示。通过近场光学显微镜,可以直接观察到横模-等离子体激元模式的光沿着平顶传输的情况。

图 6(b)是等离子体激元波导的外观形貌,其内部是硅材料,在外表面上镀了一层金属膜。远近场光转换的大致过程如下:入射的远场光(偏振方向为 y 方向)首先在 F1 表面上[图 6(c)]转换成二维表面等离子体激元模式;其次,此二维表面等离子体激元模沿着 F1 表面上传输,并且在 F1 面与平顶面的交界处转换成一维横模-等离子体激元模式;最后,横模-等离子体激元以类似于表面等离子体激元的方式沿着平顶传输,平顶在此处所起的作用就像一个金属波导一样。由于金属波导的宽度逐渐变小,最终在金属波导的末端形成很强的金属表面等离子体增

