

# 硅基波导慢光器件及其应用<sup>\*</sup>

胡应涛 李运涛 李智勇 俞育德 余金中<sup>†</sup>

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

**摘要** 硅基波导慢光器件是构建全光智能互连和实时高速测控等下一代信息技术的关键器件,在光通信和光信息处理等诸多领域具有显著的技术优势和巨大的应用潜力.随着器件结构的不断创新以及微电子制造技术的不断升级换代,硅基波导慢光器件愈来愈走向实用化.文章介绍了慢光的基本原理,概述了当前国内外硅基波导慢光器件的研究进展,着重分析了基于微环谐振腔的硅基波导慢光器件,并指出了它在具体应用领域中的发展前景.

**关键词** 慢光,群速度,光缓存,硅基波导,微环谐振腔

## Properties and applications of silicon waveguide slow-light devices

HU Ying-Tao LI Yun-Tao LI Zhi-Yong YU Yu-De YU Jin-Zhong<sup>†</sup>

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Silicon waveguide slow-light devices are essential components of next generation information technologies, such as all-optical smart interconnection and real-time high-speed detection and manipulation. This is because, with the innovations in micro-electronic fabrication and silicon waveguide design, they have many potential applications in optical telecommunication and optical signal processing. This review starts with the principle of slow-light in silicon waveguides and recent research progress, focusing on devices based on microring resonators in silicon. Finally, the advantages of these devices are discussed.

**Keywords** slow light, group velocity, optical buffer, silicon waveguide, microring resonator

### 1 引言

慢光是指光脉冲在介质中传播的群速度小于真空中的光速.1999年,Hau等人<sup>[1]</sup>在Nature杂志上发表了将光速减为17m/s的实验报道,从这开始,对慢光的研究便蓬勃地开展起来,并且已经不再局限于起初单纯地将光群速减慢,而是已经涉及到光脉冲延迟与缓存、延时可调慢光、动态光脉冲存储等诸多方面.慢光之所以受到广泛的关注,原因之一是它具有许多潜在的应用.在光通信领域,慢光可用在信号延时、数据缓存与交换等关键技术,它目前已经成为国际上光纤通信领域的一个研究热点.此外,慢光还有许多其他重要应用,如光信号的同步与整

形<sup>[2]</sup>、慢光陀螺<sup>[3]</sup>、相控阵天线中的真延时<sup>[4]</sup>、量子信息处理与存储<sup>[5]</sup>、非线性光学器件<sup>[6]</sup>、高性能和更紧凑的光调制器<sup>[7]</sup>、传感器<sup>[8]</sup>等.慢光研究的意义不仅在于这些实际应用,还在于它对科学研究有着许多积极的意义.例如,通过对慢光的研究可以加深人们对光与物质相互作用本质的理解,更进一步发现其中的物理规律;慢光过程中所呈现出来的强非线性效应也为非线性光学开辟了新的研究领域.

目前主要是利用材料色散或波导色散,在原子

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB302803)、国家自然科学基金(批准号:60877036)、中国科学院知识创新工程(批准号:ISCAS2008T10)资助项目

2009-03-16收到初稿,2009-07-10收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email:jzyu@semi.ac.cn

蒸汽、晶体、光纤、量子点/阱结构、光子晶体和波导结构等材料上实现了慢光. 基于硅基材料的慢光器件具有尺寸小、设计灵活、与成熟的微电子制造工艺兼容、便于集成等许多优点, 因此近年来倍受关注, 并且取得了长足的研究进展. 本文首先阐述慢光的基本原理, 然后对国内外硅基波导慢光器件的研究进展进行介绍, 最后探讨了其应用前景.

## 2 慢光的原理

慢光的基本原理基于群速度的定义. 群速度定义为  $v_g = \partial\omega/\partial k$ , 由关系式  $k = n\omega/c$  以及考虑介质的折射率  $n(k, \omega)$  同时是光频率  $\omega$  和传播常数  $k$  的函数, 可得

$$v_g = \frac{c - \omega \frac{\partial n(k, \omega)}{\partial k}}{n(k, \omega) + \omega \frac{\partial n(k, \omega)}{\partial \omega}}, \quad (1)$$

其中  $c$  为真空中的光速. 从(1)式可知, 减小群速度, 有三个思路: (1)增大折射率  $n$ ; (2)增大材料色散  $\partial n/\partial\omega (>0)$ ; (3)增大波导色散  $\partial n/\partial k (>0)$ . 由于普通介质的折射率与真空中的折射率相差不大, 依靠增大折射率  $n$  获得光速的减慢十分有限. 利用材料色散的慢光通常需要借助电磁诱导透明(EIT)、相干布居振荡(CPO)等相干过程来实现光谱烧孔, 或者借助受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等非线性效应来获得吸收谱上的增益尖峰. 而实现这些过程的实验装置复杂, 并且这些过程本身存在着带宽局限, 特别是利用 EIT 和 CPO 只能在特殊的介质中针对特定的波长实现光速减慢, 这些都极大地限制了基于材料色散慢光的应用. 而增大波导色散则简单易行、灵活可控, 是实现慢光的有效手段.

硅基波导慢光器件主要借助增大波导色散来实现慢光. 在一些周期性的波导结构中, 如光栅、光子晶体和谐振腔结构等, 由于波导结构参数与波长有关, 于是能够获得大的  $\partial n/\partial k$ , 从而获得低的群速度. 耦合谐振腔光波导(coupled resonator optical waveguide, CROW)是指一系列谐振腔直接耦合构成的一种波导结构, 光从一个谐振腔耦合进入相邻谐振腔的过程中需要在谐振腔中来回反射或多次循环, 从而表现出明显的慢光传播, 图1是几种常见的 CROW 结构<sup>[9]</sup>.

CROW 结构的特性主要取决于各个谐振腔的本征特性(如 Q 值、谐振频率等)以及谐振腔之间的耦合系数. 对于一个周期数足够大的 CROW 结构, 用紧束缚近似方法分析<sup>[10]</sup>, 可以得出其波导

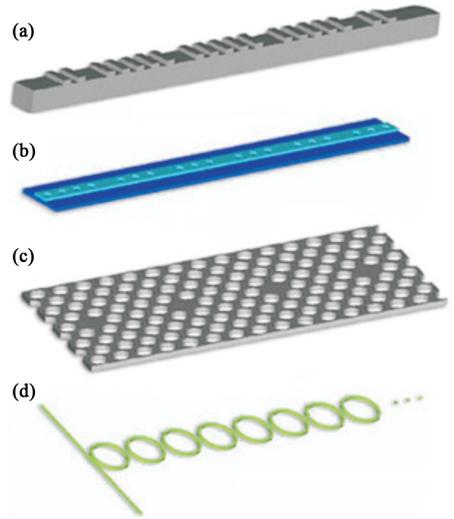


图1 (a) 耦合法布里-珀罗腔; (b) 1D 耦合光子晶体缺陷; (c) 2D 耦合光子晶体缺陷; (d) 耦合微环谐振腔<sup>[9]</sup>

模的色散关系. 图2给出了不同耦合系数下的 CROW 结构的色散曲线. 可见, CROW 中传播的波分布于以单个谐振腔的谐振频率为中心的一系列通带中, 相邻通带之间为禁带, 与禁带对应的频率的光不能在 CROW 结构中传播. 群速  $|v_g(K)| = \omega_k/\partial K$  对应于色散曲线的斜率, 在通带边缘附近, 群速很小; 在通带边缘处, 群速为零, 即在通带边缘处慢光现象最为明显. 但是在边缘处群速随频率的变化(即群速色散)很大, 这导致脉冲传播时候的失真. 相反地, 在通带中心处群速色散很小, 但是群速最大, 慢光现象最弱. 群速依赖于谐振腔之间的耦合系数, 减小耦合系数, 色散曲线将变得更加平坦, 可以获得更小的群速. 可以直观地理解为: 耦合系数越

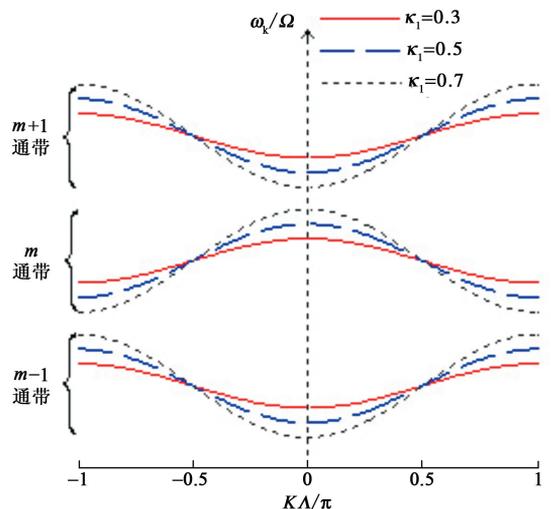


图2 不同耦合系数下无限 CROW 结构的色散曲线( $\omega_k$  为波导模的本征频率,  $\Omega$  为单个谐振腔模的频率,  $\Lambda$  为谐振腔的周期,  $\kappa_1$  为谐振腔间的耦合系数,  $K$  为传播常数)

小,光耦合进入相邻谐振需要的时间更长,从而表现为更慢的传播现象,但是耦合系数的减小,将带来CROW结构中总损耗的增大,因此在实际应用中需要折衷考虑。

### 3 硅基波导慢光器件的研究现状

#### 3.1 光子晶体中的慢光

光子晶体是一种由不同介电常数周期性排列的新型人造材料,具有独特光子带隙(PBG)特性。在光子晶体中引入缺陷形成光子晶体波导,将会在PBG中产生相应的缺陷态;对应于局域的缺陷模,在强反射背景下缺陷模频率附近存在很窄的透射峰,类似于EIT透射峰,它对应于大的色散,从而产生慢光效应。1996年,Sealora首次在一维光子带隙结构中发现了光脉冲延迟现象<sup>[11]</sup>,为光子晶体慢光揭开了帷幕。2005年,IBM公司的Vlasov等人利用低损耗硅光子晶体波导,将群速度降低为原来的1/300,并利用热光效应实现快速而高效地控制群速度<sup>[12]</sup>。2007年,Settle用基于绝缘衬底上的硅(SOI)的光子晶体波导,静态地实现延迟带宽积为30,带宽达到2.5THz<sup>[13]</sup>。静态光子晶体慢光存在着延时带宽积的局限,于是人们开始研究动态光子晶体慢光,如Stanford大学的Fan S H的研究小组对动态光子晶体进行了许多理论和模拟研究<sup>[14,15]</sup>。利用动态光子晶体可以将光脉冲延迟更长甚至实现光脉冲的停止,这将更适应各种应用需求。光子晶体慢光伴随着严重的群速度色散,导致长距离通信中光信号失真,对此,研究者们探寻了许多改善色散特性的方法,如采用W2波导<sup>[13]</sup>,调节临近缺陷波导的空气孔半径<sup>[16]</sup>或者周期<sup>[17]</sup>,采用环形孔光子晶体<sup>[18]</sup>等。此外,日本NTT研究室的Notomi等人则主要采用硅基光子晶体纳米腔阵列的结构来实现光速的减慢。最近他们报道,在大规模超高Q耦合硅基光子晶体纳米腔阵列结构中,通过透射谱测试得到 $c/1000$ 的群速度,脉冲测试出 $c/170$ 的群速度<sup>[19]</sup>。光子晶体慢光的主要优势在于其潜在的巨大带宽,结构紧凑,器件体积小;其局限在于工艺难度较大,损耗较大,群速度色散较为严重。

#### 3.2 微环谐振腔中的慢光

目前,用于慢光的微环谐振腔的基本几何构型有CROW和全通滤波器(all pass filter, APF)两种。当多个环按照APF方式与一根直波导耦合时,构成边耦合集间谐振腔系列(SCISSOR),与两根直波导耦合时

则构成双通道SCISSOR。首次利用微环谐振腔结构制作慢光器件的是Joyce等人<sup>[20]</sup>于2006年制作的12环级联的CROW型慢光结构,其显微照片如图3(a)所示。该器件实现了110—140ps的群延时,但采用的是PMMA波导,损耗大,传输损耗达15dB/cm,尺寸也较大,且不利于集成。

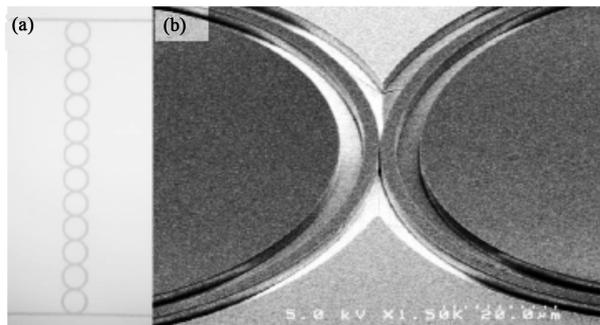


图3 (a) 12个微环CROW结构的光学显微照片;(b)微环耦合区的SEM图(微环半径为60 $\mu\text{m}$ )<sup>[20]</sup>

为了探索尺寸小、可集成、延时大的慢光器件,IBM公司的Xia等人<sup>[21]</sup>在SOI平台上制作了跑道形微环的CROW和APF两种构型的多环级联结构。条形波导截面为 $510 \times 226\text{nm}$ ,经过两次热氧化后,波导的传输损耗减小到1.7dB/cm。图4给出了56环APF构型微环级联器件的SEM照片和对应

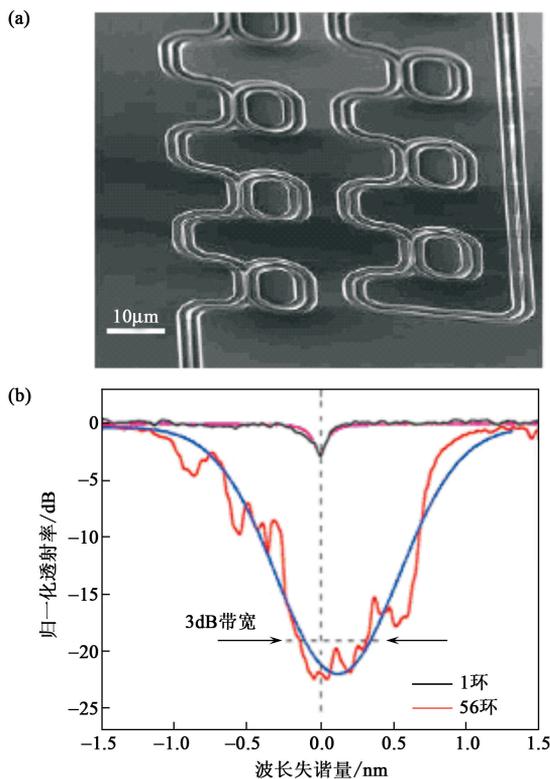


图4 APF构型的微环级联器件的SEM顶视图和对应的透射谱<sup>[21]</sup>

的透射谱,从透射谱得出其 3dB 带宽为 54GHz. 用 1Gbps 的非归零(NRZ)伪随机码序列测试表明,100 环 CROW 和 56 环 APF 结构的群延迟分别为 220ps 和 510ps. 该器件的性能比以前报道的器件有较大的改善,尤其是器件尺寸减小至  $0.03\text{mm}^2$ ,大大提高了缓存密度. 此外,其工艺与硅工艺兼容,为实现与其他光电器件的集成以及进行大批量生产提供了便利.

在长距离通信等应用中,不仅要求慢光器件具有大延时、宽带宽和低损耗等性能,而且还要求延时量灵活可调. 所幸的是,半导体波导材料的热光、电光等效应为延时可调提供了可能. Morichetti 等人<sup>[22]</sup>设计的一种可重构慢光结构就是利用热光效应实现了群延时的连续可调. 设计模型如图 5 所示,它由  $S_1$  和  $S_2$  两部分组成.  $S_1$  是  $N$  个环的 CROW 结构,利用制作在微环波导附近的铬电阻器来加热波导,在波导材料中产生热光效应调谐微环,可以改变参与延迟的微环个数  $M$ ,从而获得从 0 到  $NT_r$  一系列离散的延时,其中  $T_r$  为单环延时.  $S_2$  只有一个微环,调谐它的谐振频率,使之与信号载频发生偏离,可使信号光经历从非谐振态的最小延时  $T_{2,\min}$  到谐振态的最大延时  $T_{2,\max}$  之间的连续变化. 当满足条件  $T_{2,\max} - T_{2,\min} > T_r$  时,  $S_1$  和  $S_2$  一起就能产生 0 到  $NT_r$  之间连续可变的延迟. 该器件是通过刻蚀  $\text{SiO}_2$  衬底上的  $\text{SiON}$  层形成条形波导制作而成的,顶层覆盖硼磷硅玻璃(BPSG),在微环上制作了铬电阻器用来实现热光调谐,在大于 2.5GHz 的工作带宽内获得了 0 到 800ps 的连续可变延迟. 该器件成功地实现了较大的连续可调延迟,不足之处是其波导折射率差仅为 4.4%,对光的限制作用弱,因此器件尺寸较大,单个环的半径就有  $500\mu\text{m}$ ,可集成性方面也有待改进. 我国上海交通大学的苏翼凯等人<sup>[23]</sup>也探索了热光效应导致的延时可调,他们对 SOI 基单环 APF 进行测试,并用泵浦光的方法实现热光调节,获得了最大延时为 120ps 的可调光学延时.

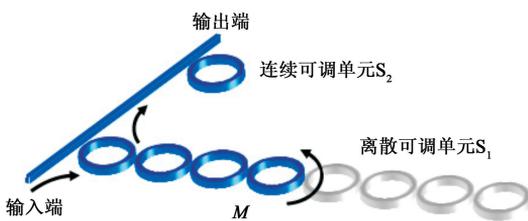


图 5 连续可调慢光延迟线方案图( $S_1$  提供一个离散的可调延迟,  $S_2$  提供一个连续的可调延迟<sup>[22]</sup>,  $M$  为参与延迟的微环个数)

在各种新型慢光器件不断研制成功的同时,人们注意到这些器件都受到延时一带宽固有极限的限制,限制了其实用化. 为了解决这一问题,研究者们希望实现动态光存储. 2007 年, Xu Q 等人<sup>[24]</sup>提出了一种动态光存储方案,其器件结构由两个半径为  $7\mu\text{m}$  的 SOI 纳米波导微环谐振腔与两根直波导耦合构成,如图 6 所示. 两个微环经过仔细设计,使得两环之间起初没有谐振(失谐量  $\lambda_A - \lambda_B = 0.35\text{nm}$ ),信号脉冲光能够由波导耦合进入谐振腔中,此时器件具有类似 EIT 特性的透射谱. 当向 A 环的上方照射一个控制脉冲光时, A 环波导中产生光生载流子并导致折射率减小,谐振峰  $\lambda_A$  蓝移;光在两环之间产生谐振( $\lambda_A = \lambda_B$ ),形成高 Q 的谐振模式(即超模),输出脉冲功率为零,即脉冲光被存储于超模之中,在输出光谱上,类似 EIT 的透明尖峰消失. 接着向 B 环上方照射另一控制脉冲光,使  $\lambda_B$  蓝移,两环再次失谐,存储在谐振腔中的光与直波导恢复耦合,从而被释放出来. 例如在 89ps 时照射 A 环存储脉冲光,130ps 时照射 B 环释放脉冲光,则脉冲被存储 41ps. 而对于不经过存储和释放过程的情况,输出脉冲光功率以指数衰减,衰减时间常数为 18.6ps. 可见,存储时间 41ps 远远超过了两环非谐振时候的光子寿命 18.6ps. 图 7 给出了器件实现存储后的透射谱和输出脉冲波形,经存储后透明尖峰减弱了,对应的输出脉冲功率也变小了. 理论上可将脉冲光存储足够长的时间,打破延时一带宽固有极限;但随着存储时间增长,脉冲光会不断损耗而减弱,限制了存储时间. 此外,需要在极短的时间内调谐微环也是该方案在实际应用时所面临的考验. 但该方案为硅基的片上光缓存开拓了思路,有望在不久的未来发展成为实用化的片上光缓存器件.

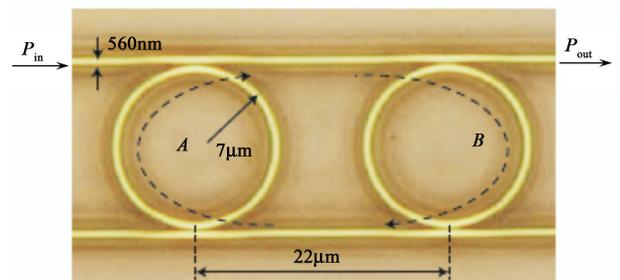


图 6 器件顶视图显微照片<sup>[24]</sup>(图中  $P_{in}$  为输入光功率,  $P_{out}$  为输出光功率)

## 4 应用前景

慢光具有非常广泛的应用,其中最基本的应用

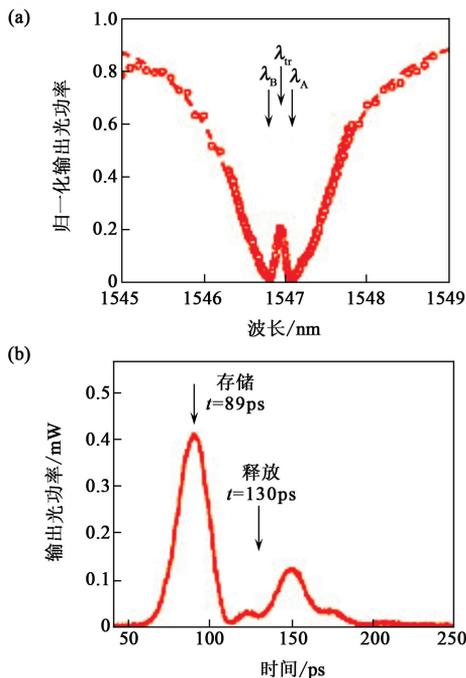


图7 器件实现存储后的透射谱(a)和输出端的脉冲波形(b) [24] (图中  $\lambda_A$  为 A 环的谐振波长,  $\lambda_B$  为 B 环的谐振波长,  $\lambda_{tr}$  为透明尖峰的波长)

就是光学延时线。低群速的光信号通过介质或器件需要更长的时间,这就表现为光信号的延时。与通过加长光路来实现的光学延时相比,利用慢光来实现的光学延时具有结构紧凑、占用空间小、延时量灵活可调等优点。一个减慢因子为  $10^4$  的慢光器件,长度仅为  $100\mu\text{m}$  便可产生 3ns 的延时,而如果利用加长光路的方式来实现相同延时,就需要 60cm 长的光纤 [25]。光学延时线有许多用途,例如在相控阵天线中,通常需要几百个延时线器件来产生光真延时 (TTD),以便对相控阵天线进行光束控向,而紧凑的慢光延时线有利于减小体积和重量,从而为相控阵天线用在雷达上带来好处。

在光通信领域,随着传输容量增加,光—电—光的数据路由和交换方式所存在的“电子瓶颈”现象更加突显,已成为制约通信网络的带宽、体积、成本、功耗和速率的重要因素。为了突破“电子瓶颈”,全光网络应运而生,成为通信网络发展的必然趋势。全光网络依赖于产生和控制数据缓存、逻辑转换和信号延迟的能力,利用慢光进行信号延时和缓存,可避免传统光纤延时线体积大、结构复杂等问题,且能够实现延时可调。当然,高速光网络中的光分组交换 (OPS) 以及光信息处理应用所需要的大延时、宽带宽对慢光器件是极大的挑战,但相信慢光技术会不断发展和成熟,从而推动全光时代的到来。

慢光延时的过程中保留了相干(相位)信息,且慢光使光脉冲之间以及光与物质之间的相互作用加强了,这使得慢光在量子信息处理、相位光调制器和传感器等方面具有应用。量子信息处理中的一个关键问题就是将光量子存储足够长的时间,以便完成量子操控。将光脉冲减慢甚至停止是获得长的存储时间的有效方法,譬如将两个光脉冲同时减慢,使它们的相互作用时间增长,从而完成量子处理。慢光使得光脉冲在更短的距离产生  $\pi$  相移, Ku 便利用这一点制作了超低  $V_\pi$  的 M-Z 光调制器 [7]。慢光波导结构中表现出一种新型的 Sagnac 效应,可用来制作高紧凑、可集成的旋转传感器和陀螺仪。此外,慢光在非线性光学器件、光学传感器、生物传感器等方面也均有良好的应用潜力。

## 5 结束语

依上所述,宽带宽、大延时、低损耗、小尺寸、可集成以及动态光存储是慢光延时与缓存器件的发展方向,而硅基波导慢光器件在这些方面显示出许多优势。特别是采用高折射率差的 SOI 基波导结构,能够极大地缩小器件尺寸,并且其制作工艺与成熟的微电子制造工艺良好兼容,能同其他 Si 基光波导器件(如光波导耦合器、调制器、光开关、光滤波器等)集成在同一芯片上,也便于同 Si 基电子器件集成;硅中丰富的热光、电光效应为实现可调延时提供了便利。通过多个波导单元级联的方式可以增大延时量,是提高器件的缓存能力的一种有效方式。目前,硅基波导慢光器件正处在广泛的研究阶段,随着新型波导结构的不断提出以及微电子加工技术的发展,我们相信,硅基波导慢光器件有望在全光通信网的数据路由和交换方面产生巨大作用,也必将在相控阵天线、量子信息处理、传感器等诸多方面找到用武之地。

## 参考文献

- [1] Hau L V *et al.* Nature, 1999, 397: 594
- [2] Fisher M R, Chuang S L. IEEE J. Quantum Electron., 2005, 41: 885
- [3] Purves G T, Adams C S, Hughes I G. Phys. Rev. A, 2006, 74: 023805
- [4] Liu Z *et al.* Opt. Lett., 2006, 31: 2789
- [5] Fleischhauer M, Lukin M D. Phys. Rev. A, 2002, 65: 022314
- [6] Harris S E, Hau L V. Rev. Lett., 1999, 82: 4611
- [7] Ku P C *et al.* Ultra-low  $V_\pi$  Mach-Zehnder modulators using electromagnetically-induced transparency. In: Optical Society of America Annual Meeting Technical Digest. 2003
- [8] Chao Peng *et al.* Appl. Opt., 2007, 46: 4125

- [9] Scheuer J *et al.* Optics & Photonics News, 2005, 16:36  
 [10] Yariv A *et al.* Opt. Lett., 1999, 24:711  
 [11] Sealora M *et al.* Phys. Rev. E, 1996, 54:R1078  
 [12] Vlasov Y, O'Boyle M, Hamann H *et al.* Nature, 2005, 438: 65  
 [13] Settle M D, Engelen R J P *et al.* Opt. Express, 2007, 15: 219  
 [14] Yanik M F, Fan S H. Studies in Applied Mathematics, 2005, 1:233  
 [15] Fan S H. Physica B, 2007, 394:221  
 [16] Frandsen L H, Lavrinenko A V *et al.* Opt. Express, 2006, 14:9444  
 [17] Jafarpour A, Adibi A, Xu Y *et al.* Phys. Rev. B, 2003, 68: 233102  
 [18] Säynätjoki A *et al.* Opt. Express, 2007, 15: 8323  
 [19] Notomi M, Kuramochi E, Tanabe T *et al.* Nature photonics, 2008, 2:741  
 [20] Poon J K *et al.* Opt. Lett., 2006, 31:456  
 [21] Xia F, Sekaric L, Vlasov Y. Nature Photonics, 2007, 1:65  
 [22] Morichetti F *et al.* Opt. Express, 2007, 15:17273  
 [23] Liu F F, Su Y K *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2008, 14:706  
 [24] Xu Q *et al.* Nature Phys., 2007, 3:406  
 [25] Ku P C, Chang-Hasnain C J, Chuang S L. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40:R93

## • 物理新闻和动态 •

### 用纳米线束实现热声转换

焦耳热是指通电导体的发热,在通常情况下,它是一个危害电器设备的因素(除了电烤箱和电熨斗之外),或者说它是一个减小电器设备效率的不可避免的损失项。最近,来自芬兰赫尔辛基技术大学的 Niskanen 等,在期刊 Applied Physics Letters (2009,95:163102)上撰文,展示了他们利用金属纳米线束阵列将焦耳热转化成声音(音乐和说话)的新设备,现介绍如下:将一束金属细线跨接在电极桥架上,当设备通过电极供给电流时,金属线束的温度将跟随电流信号的大小变化。接下来,金属线束周围的空气也将因温度的变化而产生高压疏密振荡。这个疏密振荡就像小号吹奏者吹出的音乐声波一样,是高效、可控的声源。不幸,长期以来,由于金属线以及电极桥架材料的高热导,焦耳热难以得到积蓄,以致于达不到发声所需的大的温度变化。Niskanen 等实现突破的技术关键在于:纳米尺寸的铝线其热导率大大地低于较粗的铝线。使用纳米尺寸(单根 200 $\mu\text{m}$  长, 3 $\mu\text{m}$  宽, 30nm 厚)的铝线束,作为声源部件。铝线束密集排列,在若干平方厘米的面积上可以有 200,000 根铝线穿过。铝线束两端的电极桥架就是在硅衬底上刻出来的。这样做的好处是,有利于将存储音乐信号的半导体存储器与铝线束焦耳热发声部件的电流源实现集成。

Niskanen 等在与焦耳热声源相距 8cm 的位置,测量了新热声设备的功效,结果表明,对于 40kHz 的频率,在电源功耗 17W 的情况下,声压强度略大于 100 dB。这一结果比传统的家用扬声器(距离 1m,强度 100dB,功耗 1W)的功效差了不少,但它毕竟为重现音乐展示了一条新路径。

Niskanen 等的研究也为发展高效热电器件带来启发。热电器件通常是由跨接在电极两端的高热电系数的半导体构成。当有电流通过半导体时,电极的一端将从低温热源吸热,另一端则向高温热源放热,这就是所谓的“半导体制冷”。要想提高效率,除了要选择高热电系数的材料,还要求热电材料的热导率低。Niskanen 等的实验告诉我们,采用超细的高热电系数金属线(直径小于 100 nm),很有可能解决上述问题。

(戴闻 编译自 Nature, 2010, 463:619)

### 在磁场感应条件下生成自组织胶体膜

生命系统的复杂形式及其功能是以分子的自组织为基础的。当今的材料科学家正在积极地开发种种技术和方法,以便操控和量化微粒之间的相互作用,进而获得自组织产物的特定构形。研究的目标还包括:产物在响应外部机械扰动以及热力学条件变化时的行为应该是稳定的。最近,来自卢布尔雅那大学(斯洛文尼亚)的 Osterman 等在 Phys. Rev. Lett. 上撰文,报道了他们利用交变磁场进行控制,成功合成自组织胶体膜的工作。研究者令微米尺寸的胶体微粒处于动态调制的磁场中。他们观察到:所生成的自组织胶体膜具有许多生物学特征,特别是在机械扰动后的结构自愈合功能。

Osterman 等的实验是利用三轴磁场量化自组织微粒间的相互作用。3 对赫尔姆霍茨线圈按照垂直( $z$  轴)和水平( $x$  轴和  $y$  轴)方向安放。垂直线圈通以稳恒电流,产生磁场的静态分量;另外两对线圈通以具有位相差的交变电流,产生一个在水平面内旋转的磁场。最终的合成磁场在一个圆锥面上绕  $z$  轴旋转近动,场矢量与  $z$  轴的夹角  $\theta_m$  依赖于垂直分量与水平旋转分量间的相对幅值。样品胶体微粒位于磁场中央,在一级近似下,超顺磁微粒的感应磁矩的取向跟随外场。

研究者测量了胶体微粒间的相互作用对夹角  $\theta_m$  的依赖关系。他们发现在所谓魔角条件下( $\theta_m = 54.7^\circ$ ),被静态磁场分量感应的微粒间“偶极相互作用”与被水平面内旋转磁场感应的“负偶极相互作用”,两者正好相互抵消。结果使微粒间的相互作用成为长程的和各向同性的,并且其数学表达式十分类似于原子间的范德瓦尔斯相互作用。Osterman 等通过时间序列的快速摄影,记录了悬浮胶体(密度为每  $\mu\text{m}^3$  包含 0.15 个微粒)膜在磁场感应条件下自组织生长的过程。有专家认为,Osterman 等的工作为自组织物理学的发展以及功能材料合成技术的开发,提供了强有力的工具。

(戴闻 编译自 Nature, 2009, 463:302 和 Phys. Rev. Lett., 2009, 103:228301)