

硅基纳米光波导微腔全光开关新进展

李淳飞[†]

(哈尔滨工业大学理学院物理系 哈尔滨 150001)

2015-07-15收到

[†] email: cfl@hit.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20151203

Silicon-based nanowaveguide microcavity all-optical switches—a research breakthrough

LI Chun-Fei[†]

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要 全光开关研究已有50年历史,至今尚未全面达到实用开关器件所要求的技术指标。近几年来基于SOI材料(做在绝缘层上的硅材料)、工作在光通信波长、采用成熟CMOS工艺(互补金属氧化物半导体工艺)的硅基纳米波导微腔结构全光开关已成为国际科学界的研究热点,大大推进了全光开关的实用化。文章介绍了国际上近十年研究硅基纳米波导微腔全光开关的5种典型方案,包括脊形和槽形纳米光波导;环腔和F-P腔两种微腔结构;纳米光波导、光子晶体、表面等离子体激元三种工作原理。分析总结了它们的共同特点和值得借鉴的研究经验,以便推动国内相关研究工作的开展。

关键词 全光开关,非线性光学,SOI材料,纳米光波导,微腔,CMOS工艺

Abstract All-optical switches have been studied for 40 years, but still do not fully meet the technical requirements for practical optical switching devices. In recent years there has been much interest in all-optical switches with silicon-based nanowaveguide microcavity, fabricated from silicon-on-insulator materials through mature CMOS processes, working at optical communication wavelength; this has greatly promoted the development of practical all-optical switches. This paper will review five types of these switches, including the ridge and groove nanowaveguide types, the ring resonator and FP cavity microcavity types, as well as the working principle of optical nanowaveguide, photonic crystal, and surface plasmon. Their common characteristics and results of past investigations are analyzed and summarized, in the hope of promoting future research in this field in China.

Keywords all-optical switch, nonlinear optics, silicon-on-insulator material, nanowaveguide, microcavity, CMOS process

自从1964年A. Szöke等人首次提出双稳态激光器的思想^[1]以及1975年H. M. Gibbs等人首次完成折射型光学双稳器件的实验^[2]以来,至今全光开关的研究历史已长达半个世纪,经历了3个发展阶段:光学双稳态全光开关研究阶段^[3],非线性干涉仪全光开关研究阶段^[4],以及纳米尺寸全光开关研究阶段^[5]。但是,迄今为止还没有有可实用的全光开关器件问世。

实用的全光开关要求达到以下技术指标:(1)低驱动功率。开关功率低至mW量级;(2)高开速度。开关时间短至ps量级;(3)低光损耗。插入损耗低至dB量级;(4)信号光波长采用光通信波长1550 nm;(5)器件制备采用成熟的电子器件工艺——互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺。

研究结果表明,对基于非线性光学原理的全光开关器件,在微米尺寸以上的宏观条件下,上

述技术指标是相互矛盾的,无法在一个器件上同时实现。例如,液晶材料器件,非线性光学效应很强,所需的开关功率较低,但开关时间太长,甚至长达秒量级;又如化合物半导体材料(如GaAs, InP)器件,非线性光学效应较强,但开关功率高于毫瓦,开关时间受载流子复合寿命的限制,只能达到纳秒量级,而且因光吸收太强,器件的插入损耗很大;再如硅(以及石英等)材料器件,光学透明度高,光响应速度快。但是由于材料的对称性高,光学非线性很低,因此所需开关功率很高。长期的研究表明,为实现全光开关的实用化,必需压缩器件的尺寸,采用纳米全光开关器件。同时为提高开关时间,必需采用超短脉冲激光作泵浦光。也就是说,全光开关器件只有在空间和时间高度压缩的情况下才有可能获得应用。

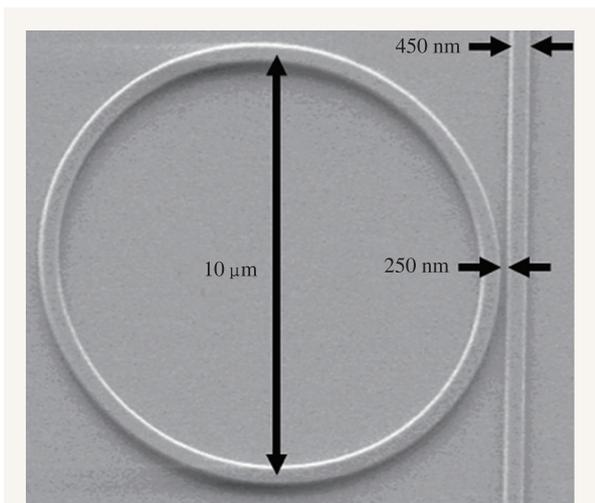


图1 脊形硅纳米波导环腔全光开关的结构图

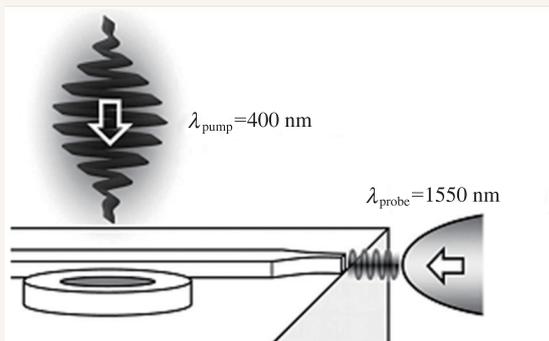


图2 信号光与泵浦光对环共振腔全光开关的输入方向示意图

近十多年来,国际上开展了大量纳米全光开关的研究。有些纳米全光开关器件,在开关功率和开关时间这两个指标上,有可能同时达到应用指标,但是在光学损耗、工作波长和制备工艺等方面不能满足应用的要求,大部分器件很难做到实用化和集成化。最近几年来,科学家们把注意力集中到基于硅材料和纳米波导微腔结构的全光开关的研究方向上来,在全光开关实用化的道路上跨进了一大步。下面我们介绍近十年来国际上研究硅基纳米波导微腔全光开关的5种典型的方案。直到目前为止,我国尚未发表这方面的研究成果。

1 脊形硅纳米波导环腔全光开关

为了提高全光开关的开关速度,降低光损耗,最好采用硅材料。但是硅的光学非线性太低。对波长 $\lambda=1550\text{ nm}$,其非线性折射率系数 $n_2=4\times 10^{-14}\text{ cm}^2/\text{W}$ 。因此采用环形共振腔结构,可以无限延长器件的非线性作用长度,积累光学非线性,以便在较低泵浦光下实现光开关运转。

2004年,美国Lipson研究组在*Nature*杂志上刊登了硅基纳米波导环腔全光开关的实验报道^[6]。他们采用电子束曝光和反应离子束刻蚀技术,以SOI材料制备脊形纳米波导,该波导横截面尺寸为:宽 \times 高=450 nm \times 250 nm。用纳米波导构成直径为10 μm的共振环。圆环波导与直波导的间隙为250 nm。器件结构如图1所示。器件的插入损耗小于0.5 dB。

该光开关采用交叉泵浦工作方式,如图2所示。信号光是中心波长为1550 nm、波长可调的半导体连续激光,通过锥形波导耦合器入射共振环。泵浦光采用钛宝石飞秒激光,具有脉宽120 fs、单脉冲能量1.5 nJ、重复率80 Hz和波长800 nm。输出光被BBO晶体转换成波长400 nm、平均能量小于120 pJ的飞秒激光,垂直照射器件的环形表面。飞秒激光与硅材料相互作用,产生双光子吸收(TPA)效应:硅材料的折射率变化 Δn 与泵浦光的平均功率的平方 P_{avg}^2 成正比^[4];而对一般单光子吸收,即光克尔效应, Δn 与泵浦

光的功率 P 的一次方成正比。因此双光子效应比光克尔效应所需的开关功率低约 1000 倍。

输出信号光的透射率与波长的关系曲线是周期性的，如图 3 所示。无泵浦光时，信号光波长处于透射谷处，器件处于关闭状态；当泵浦光照射器件时，在硅材料中产生 TPA 效应：双光子激发电子—空穴对，改变电子与空穴载流子的浓度，引起材料的折射率变化，导致器件的透射谱发生移动，器件的透射率从透射谷变为透射峰，于是器件的状态发生从关闭向开启的转变。从 1554.5 nm 的透射谷转变为 1554.6 nm 的透射峰的过程中，波长变化量仅为 0.1 nm，相应的材料折射率变化约为 10^{-3} 。这种基于 TPA 的全光开关，平均开关功率小于 10 mW，开关时间约为 70 ps，这些指标已接近实用器件的指标。

2 充有机材料的竖槽形硅纳米波导环腔全光开关

硅材料的双光子吸收过程中存在着自由载流子吸收(FCA)效应，载流子复合时间约 1 ns，这限制了以上脊形硅纳米波导的非线性响应时间，约 100 ps。也就是说，用这种脊形硅纳米波导进行全光信息处理，速率只能达到 10 Gb/s。为了加快硅纳米波导的信号处理速度，科学家们建议将脊形硅纳米波导改为槽形硅纳米波导，用高非线性有机分子材料填入槽中，构成硅和有机材料混合的波导，被称为 SOH(silicon-organic-hybrid)波导。因为有机分子材料的非线性响应时间为 1 ps，而且有机分子起着缩短硅材料载流子复合时间的作用。因此槽形硅纳米波导的非线性响应时间可提高到 10 ps 量级，采用这种槽形硅纳米波导，进行全光信号处理，其速率可比脊形硅纳米波导提高 10 倍，达到 100 Gb/s。

2009 年 C. Koos 等人在 *Nature Pho-*

tonics 杂志上发表了槽形硅纳米波导的研究结果。并用这种波导演示了从 170.8 Gb 到 42.7 Gb 的全光解时分复用(OTDM)实验，证明了这种新型波导具有 100 Gb/s 的全光信号处理能力^[8]。

该竖槽形硅纳米波导是用 CMOS 工艺制备的，即在 SOI 晶片上做深紫外光刻和反应离子刻蚀。波导横截面尺寸如图 4(a)所示：高 $h=220$ nm，宽 $W=212$ nm，狭缝宽 $W_{\text{slot}}=205$ nm，波导总长 $L=4$ mm。波导截面的扫描电子显微镜(SEM)照片如图 4(b)所示。

用气相沉积方法在槽形硅波导的狭槽中以及硅波导周围空间均匀填入有机小分子 DDMEBT，其线性折射率为 1.8，而 Si 的线性折射率为 3.5。DDMEBT 分子的非线性折射系数为 $n_2 = 1.7 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$ (对波长 1.5 μm)。由于纳米硅波导界面的倏逝场增强效应和有机分子的高非线性，使狭槽中的横向光电场 E_x 很强，狭槽成为导光的主要通道。这就在纳米尺寸条件下，形成一种特有的低折射率光波导。波导的传输损耗为 1.5 dB/mm，输入光纤与光波导之间的耦合损耗为 4.1 dB。

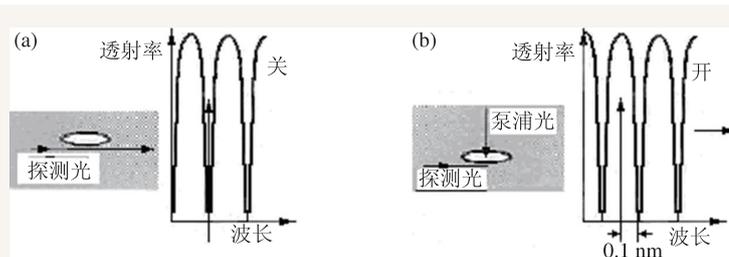


图 3 硅纳米波导环腔全光开关工作原理(泵浦功率引起信号光透射谱移动，输出信号光波长从透射谷移到透射峰，实现光开关)：(a) 无泵浦光，器件关闭；(b) 加泵浦光，器件开启

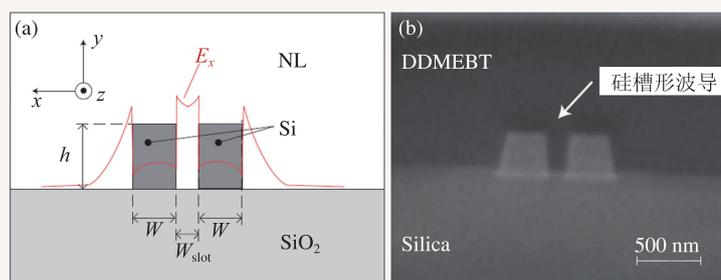


图 4 竖槽形硅纳米波导的横截面图：(a) 波导的结构尺寸和电场(E_x)的分布图(硅(Si)波导以 SiO_2 为衬底，NL 为非线性有机小分子)；(b) 硅槽形纳米波导的扫描电子显微镜照片

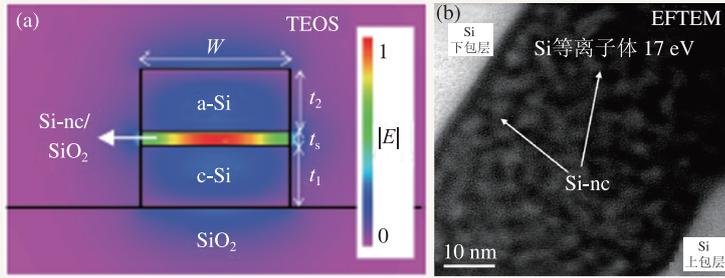


图5 Si-nc/SiO₂横槽形硅波导全光开关结构: (a) 波导横截面尺寸和横向电场分布; (b) 槽中的Si-nc/SiO₂材料的EFTEM照片(显示Si-nc在槽形波导中分布的均匀性)

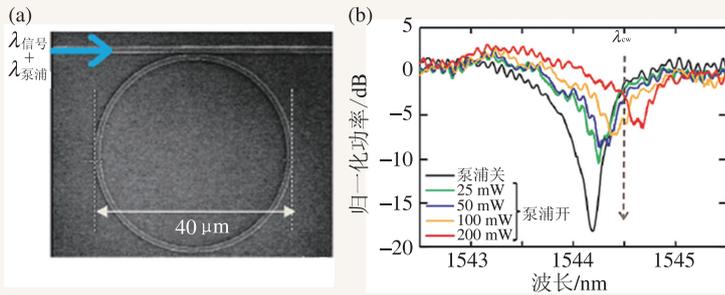


图6 Si-nc/SiO₂横槽形硅波导环腔全光开关: (a) 波导环腔的扫描电镜照片; (b) 不同泵浦光功率下, 器件输出信号的功率—波长关系曲线(泵浦光功率从0(黑色线)上升到100 mW(黄色线), 实现调制度大于50%的光开关)

论文作者演示了用一个槽形硅纳米波导完成的全光传输实验。这是用四波混频方法对OTDM信号进行解复用的实验。实验证明, 槽形硅波导器件的响应速度小于10 ps, 对光信号的传输速率接近100 Gb/s。这种竖槽形波导若做成一个环腔结构, 即可构成竖槽形硅纳米波导环腔全光开关器件。

3 充Si-nc/SiO₂的横槽形硅纳米波导环腔全光开关

2010年, Alejandro Martinez等人在*Nano Letter*杂志上报道了他们研制的横槽形硅纳米波导全光开关的新方案^[12]。他们用CMOS技术在SOI晶片上制备的横槽形硅波导如图5(a)所示。波导的衬底为SiO₂(石英); 下包层是晶体硅c-Si, 厚度为 $t_1=220$ nm; 上包层是非晶硅a-Si, 厚度为 $t_2=220$ nm。横槽层中间充以Si-nc/SiO₂(即包含在SiO₂中的纳米硅晶Si-nc)材料, 它是用低压化学气相沉积(LP-

CVD)技术, 将直径2.4 nm的纳米硅晶Si-nc嵌入SiO₂材料中构成的。横槽厚度为 $t_s=50$ nm。波导的宽度为 $W=500$ nm。整个波导用四乙基原硅酸盐材料(TEOS)覆盖。横槽层材料具有高光学非线性, $n_2=2 \times 10^{-12}$ cm²/W, 由于倏逝场的作用, 使电场集中在波导横槽的中部, 形成了一个横向的低折射率光波导。图5(b)给出了Si-nc/SiO₂的能量滤波透射电镜(EFTEM)照片。其纳米缺陷抵消了自由载流子吸收对开关速度的限制, 因此该材料对泵浦光具有高响应速度。用LP-CVD技术沉积Si-nc/SiO₂, 传输损耗较大, 约为20 dB/cm, 若改用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术, 则传输损耗仅为4 dB/cm。

图6(a)给出用横槽形波导制备的半径20 μm的环形共振腔全光开关的扫描电镜照片。环与直波导的间距为250 nm, 器件总面积是500 μm²。低功率下测得的环腔的线性透射谱(无泵浦光), 如图6(b)中的黑线所示, 它具有17 dB的最大谷值。该环腔的品质因子为1875, 相当于腔的光子寿命为1.54 ps。

为观察环腔的动态行为, 将信号光与泵浦光一起从左边端口入射器件。信号光为波长1544.5 nm的连续光(靠近共振波长); 泵浦光为脉冲光, 由光纤激光器输出, 具有脉宽1 ps和重复频率10 GHz, 其波长选择为1557.5 nm(相邻的另一共振波长)。泵浦光在器件内引起折射率变化, 但在输出端口被滤波器滤除。当泵浦功率从0增加到200 mW, 器件的透射光谱发生如图6(b)所示的红移。可见在100 mW的泵浦光驱动下, 信号光实现了调制度大于50%(3 dB)的光开关, 并测得开关时间为10 ps。

4 硅/空气光子晶体脊形波导F-P腔全光开关

2010年, Michele Belott等人提出一种在脊形硅纳米波导上制作硅/空气光子晶体一维F-P腔的

全光开关新方案^[9]。其外形结构如图7(a)所示。用电子束曝光和反应离子束刻蚀技术在SOI材料的SiO₂衬底(厚1 μm)上做一条长10 μm、宽500 nm、高260 nm的脊形纳米硅波导,再用化学腐蚀方法在硅波导上制备由空气圆柱构成的单行二维光子晶体F-P干涉仪。它由两个光子晶体反射镜构成,具有以1.55 μm通信波长为中心的反射带。每个反射镜有12个圆洞,其中6个直径相同(98 nm)、间距相等(350 nm)的圆洞构成反射区。为减少散射损耗,增大 Q 值,反射镜两边各设有一个锥形耦合区,它是由直径和间距渐变的3个圆洞(直径65 nm, 80 nm, 85 nm; 间距300 nm, 315 nm, 325 nm)构成。两反射镜的间距(腔长)为425 nm。图7(b)给出纳米F-P腔上表面的扫描电镜图。整个器件的有效面积仅有5 μm²(长10 μm×宽0.5 μm)。

对以上器件结构用二维有限时域差分法(FDTD)进行数值模拟,得到器件的透射光谱,如图8(a)所示,显示在光子晶体的带隙的中部有一共振波长(~1500 nm)。图8(b)显示信号光透射谱的峰值波长随泵浦光功率增强而蓝移的情况。若无泵浦光时,信号光的透射谱为实线,峰值波长为1502.3 nm,对应于器件的开启状态;若加泵浦光时,信号光的透射谱变为虚线,峰值波长1500 nm(蓝移了-2.3 nm),对应器件的关闭状态。

该光开关实验所用的泵浦光是由调 Q 、倍频的Nd:YAG激光器产生的,其波长为532 nm,脉宽2.5 ns、重复频率11 kHz,用显微镜物镜将光束聚焦到样品的光腔表面(光斑直径约5 μm),产生自由载流子,降低硅的折射率(光克尔效应),导致光腔透射率突变。用InGaAs雪崩二极管探测得到泵浦光随时间变化的波形。实验表明,此器件的开关功率低于120 fJ,开关幅度大于10 dB。开关时间因受泵浦光的脉宽所限,只表现为ns量级。

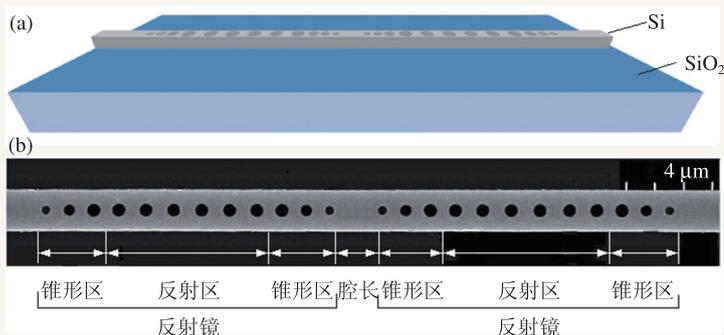


图7 纳米硅波导光子晶体F-P干涉仪全光开关(腔长为425 nm): (a)器件的外形结构图; (b)光子晶体纳米F-P腔的扫描电镜图

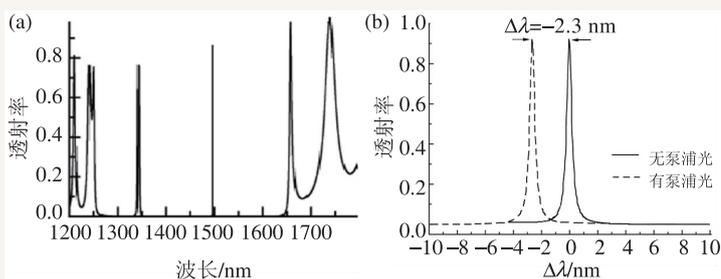


图8 用FDTD法模拟图7所示纳米硅波导光子晶体F-P腔结构的透射光谱:(a)宽带透射谱,表明腔共振波长1500 nm处于光子晶体带隙的中央;(b)透射谱随波长差的变化而移动。无泵浦光时透射谱(实线),峰值波长为1502.3 nm,对应器件的开态;加泵浦光时透射谱(虚线),峰值波长变为1500 nm,对应器件的关态

5 MDM型SPP硅纳米波导环腔全光开关

2011年,S. Sederberg等人在*Optics Express*杂志上提出了一个基于金属—电介质—金属(MDM)型表面等离子体激元极化子(SPP)的硅纳米波导环腔全光开关的设计方案^[10]。此器件是用SOI材料,在石英衬底(浅蓝色)上,用电子束曝光与聚焦离子束刻蚀的方法,做出直径为 $r = 560$ nm的硅波导微环共振器(深蓝色),其波导宽度为 $W_{\text{Si}} = 100$ nm,厚度为 $t = 100$ nm。微环波导与直波导的间隔为 $g_{\text{Si}} = 25$ nm。采用具有光通信波长的信号光通过直波导进入微环激发SPP波。为了用另一束飞秒激光作为泵浦光,用以引发硅材料中的自由载流子,在硅微环外侧做有一个紧贴着硅环的石英环(浅蓝色),此波导宽度也为 $W_{\text{SiO}_2} = 100$ nm,它与微环的间距为 $g_{\text{SiO}_2} = 20$ nm。最后,在两环波导以外的石英衬底上

镀以厚度为 100 nm 的银(浅灰色), 形成 MDM 型的 SPP 波导全开关器件, 如图 9 所示。

为了用泵浦光激发硅波导中的自由载流子, 泵浦光的波长必须选择高于硅的带隙能量的波长。并采用超短脉冲激光(如飞秒激光), 有利于加快开关时间。为了克服硅中载流子复合时间对开关时间的限制, 可在硅中掺入离子(如氧离子

O^+), 形成载流子的捕获中心, 使载流子复合时间缩短到 1ps。因此器件的硅材料建议采用离子掺杂硅(ion-implanted silicon), 即 II-Si。

该文作者还用 3 维 FDTD 方法数值模拟了在准稳态条件下两个波导中光的传输规律。假设入射硅环的信号光是以 1550 nm 为中心波长的宽脉冲激光, 其半峰值宽度为 390 nm。信号光在硅环中激发 SPP

波, 波长为 1515 nm, 其感受的折射率为 $n_{\text{eff, Si}}=3.382$, 传输损耗为 $4.371 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 。信号光在硅环波导横截面上的电场强度分布如图 10(a)所示, 其透射谱(透射率—波长关系)如图 10(b)所示。

假设泵浦光是以 800 nm 为中心波长的宽带脉冲激光, 半峰值宽度为 94 nm, 泵浦光进入石英环, 它在石英环波导横截面上的电场强度分布如图 10(c)所示, 此 SPP 波感受的折射率为 $n_{\text{eff, SiO}_2}=1.742$, 传输损耗为 $2.292 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 。此泵浦光激发的 SPP 波通过倏逝场进入硅环, 激发硅的自由载流子, 改变其折射率。硅环中渗透的泵浦光功率与 $0^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ 范围内环角度的关系如图 10(d)所示(选 10 个点计算)。可见在环角度达到 30° 时, 有最大的泵浦功率, 以后功率随光损耗的加大而衰减, 直到 $\theta = 135^\circ$, 保持极小值在环内传播。主要的载流子激发发生在 $\theta \leq 65^\circ$ 范围内。

以上的讨论是在波长为 1515 nm 时的透射率极小处。为实现全光开关, 泵浦光选用脉宽 10 fs 的短脉冲光, 渗入硅环中, 改变自由载流子浓度, 因而改变波导的折射率, 使 SPP 波的透射谱发生向短波长方向移动。当透射率从 1515 nm 的谷值移动到峰值时, 器件从关到开。计算表明, 开关能量仅需 0.88 pJ , 开关时间达到 3 ps。

总之, 硅基纳米波导微腔全光开关的设计方案有多种, 现将上述 5 种设计方案的全光开关中的纳米波导结构

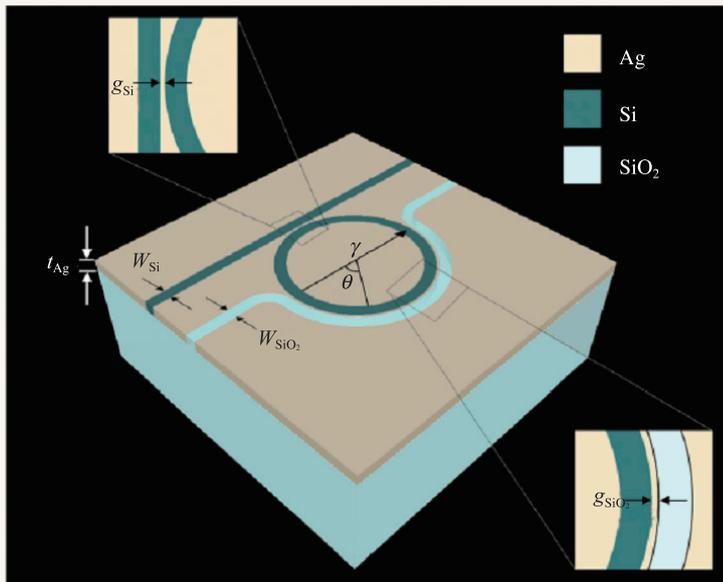


图 9 硅基 MDM 型 SPP 波导环腔全光开关器件结构

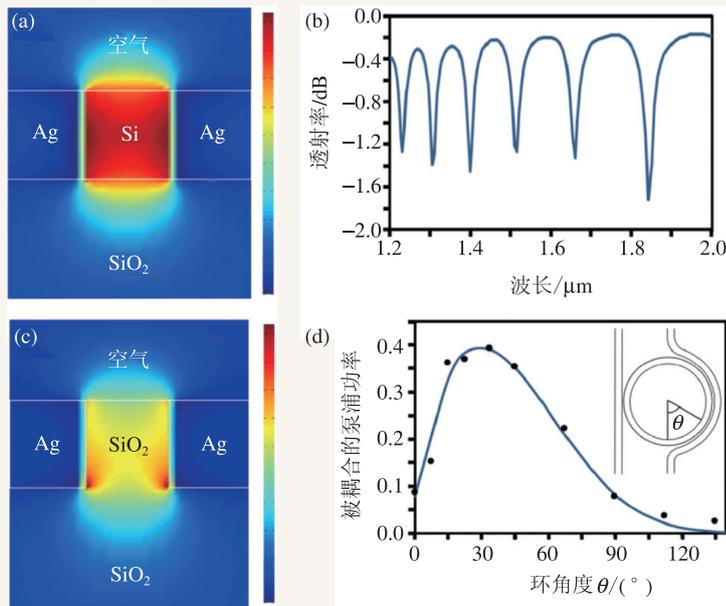


图 10 数值模拟的横截面上的光电场分布与传播特性: (a)硅环波导横截面上的电场分布; (b)硅环中 SPP 波透射率随波长的变化; (c)石英环波导横截面的电场分布; (d)硅环中被耦合的泵浦功率随纳米环角度 θ 的变化

和微腔总结于图 11 中。它们是：
 (a) 脊形硅波导环腔(见第 1 节)；
 (b) 充有机分子材料的竖槽形硅波导环腔(见第 2 节)；
 (c) 充 Si-nc/SiO₂ 材料横槽形硅波导环腔(见第 3 节)；
 (d) 光子晶体脊形硅波导 F-P 腔(见第 4 节)；
 (e) MDM 型 SPP 硅波导环腔(见第 5 节)。

这 5 种硅基纳米硅波导微腔全光开关研究方案有以下共同特点：

- (1) 探测光采用波长为通信波长(1550 nm)的连续光或宽脉冲光；
- (2) 为提高开关速度，泵浦光为超短脉冲光(皮秒或飞秒脉冲)；
- (3) 材料采用以硅为衬底的 SOI 晶片，其中硅材料用氧离子掺杂硅；
- (4) 采用纳米硅波导，结构有脊形或槽形(竖槽形和横槽形的)；
- (5) 器件多采取纳米硅波导构成的微共振腔(环腔或 F-P 腔)结构；
- (6) 器件的设计可利用光子晶体或表面等离子激元技术；

参考文献

[1] Szöke A, Daneu V, Goldhar J *et al.* Applied Physics Letters, 1969, 15: 376
 [2] Gibbs H M, McCall S L, Venkatesan T N C. Phys. Rev. Lett., 1975, 36: 1135
 [3] Gibbs H M. Optical Bistability: Controlling Light with Light. Academic Press, Inc. USA, 1985
 [4] 李淳飞. 全光开关原理. 北京: 科学出版社, 2010
 [5] 李淳飞. 物理, 2012, 41(1): 9

- (7) 器件制造采用制备微米电子器件的 CMOS 半导体集成工艺；
- (8) 器件测试采用近场光学手段：扫描近场显微镜与纳米探针。

在以上工作的基础上，有可能在不久的将来，将全部纳米光子器件(半导体激光器、光放大器、光调制器、硅基全光开关、光探测器以及其他光波导器件)与纳米电子器件共同集成在同一块 SOI 晶片上，从而实现全光计算机所需的光逻辑运算和全光通信所需的全光交换，以及全光物联网上的全光互联等关键技术。

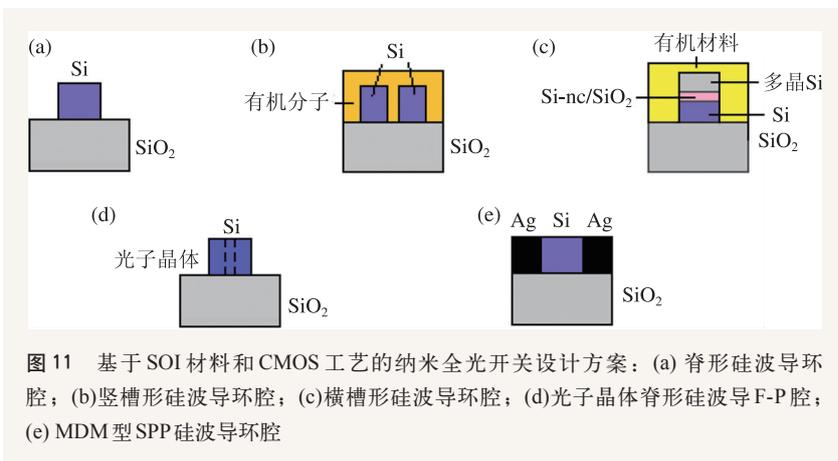


图 11 基于 SOI 材料和 CMOS 工艺的纳米全光开关设计方案：(a) 脊形硅波导环腔；(b) 竖槽形硅波导环腔；(c) 横槽形硅波导环腔；(d) 光子晶体脊形硅波导 F-P 腔；(e) MDM 型 SPP 硅波导环腔

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投稿与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰，色泽饱满，具有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

被选用的封面素材提供者，均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029。

《物理》编辑部