

基于银纳米链的马赫-曾德干涉仪结构的生物传感器

王坤 段高燕 郎佩琳 赵玉芳 刘尖斌 宋钢

**Biosensor based on plasmonic Mach-Zehnder interferometer with metallic gratings**

Wang Kun Duan Gao-Yan Lang Pei-Lin Zhao Yu-Fang Liu Jian-Bin Song Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 017301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211420

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211420>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 基于银纳米链的马赫-曾德干涉仪结构的生物传感器\*

王坤 段高燕 郎佩琳 赵玉芳 刘尖斌 宋钢†

(北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2021年8月2日收到; 2021年9月8日收到修改稿)

优化了一种基于表面等离子激元银纳米链的马赫-曾德干涉式传感结构. 该结构由参考臂、传感臂及纳米线波导构成. 纳米线波导由银纳米线包裹一定厚度的硅来构成. 引入两条银纳米链分别作为马赫-曾德干涉仪的参考臂和传感臂, 并研究所设计结构的传输特性, 通过降低传输损耗以提高所设计结构的精确度与灵敏度. 相比于两条完全相同的银纳米线作为参考臂和传感臂的情况, 在参考臂和传感臂改为银纳米链后, 传输特性有明显提高, 单位长度损耗明显降低. 这是由于银纳米链中的单元结构之间的长程/库仑相互作用增强了结构中的电磁场, 进而降低了传输损耗. 将两条银纳米链的晶格常数设置为不同的情况, 研究发现, 在特定的银包硅纳米线的宽度与某些占空比下, 含有非对称的银纳米链结构的单位传输损耗小于含有对称的银纳米链结构. 由此可以知道, 具有小损耗的银纳米颗粒链可以弥补大损耗的银纳米颗粒链的传输损失. 利用这个特点, 进一步优化设计结构, 将一侧银纳米链改为纳米线. 改变另一侧银纳米链的晶格常数与占空比, 可以发现大多数情况下, 这类结构传输特性优于含有两条银纳米链以及含有两条银纳米线的结构. 本文的设计结构可以大幅减小传统的马赫-曾德干涉仪的传输损耗, 且在结构的制备过程中容错率高, 在实际应用中有巨大的潜在应用价值.

**关键词:** 传感器, 表面等离子激元, 马赫-曾德干涉仪**PACS:** 73.20.Mf**DOI:** 10.7498/aps.71.20211420

## 1 引言

近年来, 传统的光学传感系统在传感性能和集成度上都有了很大的突破<sup>[1,2]</sup>, 同时也降低了成本. 在生物传感器领域, 传统的光学传感技术存在着高成本、大体积、集成难度大的缺陷, 而一系列新型生物传感器以其成本低、体积小、灵敏度高、响应快等特点成为众多研究者的目标<sup>[3,4]</sup>. 生物传感器在临床检测、水质监测和病毒检测中有着广泛的应用<sup>[5]</sup>. 目前, 生物传感技术已经取得了一些成果. 其中, 表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 作为新一代传感技术, 因具有能够克服光学

衍射极限这一优势<sup>[6]</sup>而有着巨大的发展潜力, 并引起了许多学者的关注<sup>[7,8]</sup>. SPPs 对其周围介质折射率的变化非常敏感<sup>[9]</sup>, 基于 SPPs 的金属微纳结构成为生物传感器器件的新选择. 典型的基于 SPPs 的生物传感技术是通过棱镜将入射光耦合到金属与介质的交界面形成 SPPs, 这样的结构也称为 Kretschmann 结构<sup>[10]</sup>. 该结构的特点是角谱灵敏度较高, 缺点是由于尺寸过大不易集成. 另一种替代棱镜激发方法是利用金属纳米结构激发 SPPs 并集成到芯片上. 虽然基于 SPPs 的生物传感器克服了尺寸大、难以集成的缺点, 但要想在生物传感领域得到实际应用, 还需在灵敏度上取得重大突破, 如 Hao 和 Sabarinathan<sup>[11]</sup>、Mirzanejhad 等<sup>[12]</sup>

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11604020) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [sg2010@bupt.edu.cn](mailto:sg2010@bupt.edu.cn)

提出了一种灵敏度为 468 nm/RIU 的基于 SPPs 的马赫-曾德干涉 (Mach Zehnder interferometer, MZI) 传感器. 该传感器灵敏度较低, 且由于尺寸原因, 缺乏与电子芯片集成的可能<sup>[13]</sup>. 为了提高生物传感器的传感性能, 对波导结构进行优化成为提高灵敏度的关键技术之一<sup>[14]</sup>, 如杂化 SPPs 波导<sup>[15,16]</sup>、绝缘体硅基 (SOI) 波导、水平凹槽加载金属条的混合 SPP 波导<sup>[17]</sup>、狭缝 SPPs 波导<sup>[18]</sup>等. 另外, 已经出现了多种纳米生物传感器, 如亚波长波导传感器<sup>[19]</sup>、基于 MZI 的传感器等<sup>[20–22]</sup>. 王芳等<sup>[23]</sup>提出一种非对称银膜多孔硅-氟化钙等离子体波导结构, 易于实现表面等离子体传感, 为无标记生物化学传感提供了一种可行的方案. 时尧成等<sup>[24]</sup>提出一种基于非对称干涉臂马赫-曾德干涉仪型传感器, 采用非对称马赫-曾德臂直接引入相位差, 无需刻蚀液体槽, 大大简化工艺难度, 无需套刻工艺, 同时拥有与传统马赫-曾德型传感器比拟的特性. 为了进一步提高生物传感器的传感性能, 将金属微纳结构与 MZI 传感结构相结合, 提出了一种新型的金属微纳 MZI 传感结构. 通过调整传感器结构尺寸, 可以有效地提高传感器的传感性能, 成为传感技术的有效原型. 对于以往的工作来说, 研究点大多集中在了如何提高传感器的灵敏度. 但是基于 SPPs 的传感器中的损耗并没有引起过多的关注. 而降低传感器的损耗, 同样可以增强传感器的性能. 提高传感器的精确度.

本文优化了银包硅纳米线的 MZI 生物传感器. 将基于银包硅纳米线的 MZI 传感器两侧放置两列周期性排列的银纳米颗粒链结构. 该传感器的波导由硅纳米线和包裹着硅纳米线的银外壳组成, 波导两侧是沉积在二氧化硅衬底上的银纳米链结构, 银纳米颗粒链与硅包银纳米线波导之间的间隙作为 MZI 的双臂, 这种狭缝波导由于高折射率对比度或 SPPs 在近场范围内将电场增强而限制了纳米狭缝内光的模式, 并通过调整两侧周期性银纳米颗粒链的大小与晶格常数, 来优化传感器的传输性能的效果. 该传感器能有效地降低传输损耗, 提高传感性能.

## 2 计算模型

本文设计了一种新的传感器, 该传感器基于 SPPs 并结合了 MZI 来实现更高的传感性能.

传感结构的示意图如图 1(a) 所示, 该结构的横截面图如图 1(b) 所示. SiO<sub>2</sub> 用作衬底材料. 横截面积为  $W_{Si} \times h_{Si}$  的硅纳米线位于由两个银纳米立方链组成槽的中心. 银纳米线宽度为  $W_{Ag}$ , 银包硅纳米线与银纳米颗粒链之间的间距为  $W_{slot}$ ,  $L'$  是两个银纳米颗粒之间的距离, 两条银纳米颗粒链的晶格常数分别为  $L_1$  和  $L_2$ . 单个银纳米颗粒沿着  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个坐标轴方向的尺寸分别为  $l_{Ag}$ ,  $h_{Ag}$  和  $r_i L_i$ . 其中  $i = 1, 2$ ,  $r_i$  是银纳米颗粒的长度和晶格常数之间的占空比 (即  $L_i/L'$ ). 整个结构覆盖于液体媒质 (乙烯-异丙醇水溶液) 当中. 银的介电常数通过 Drude 模型<sup>[16,25]</sup> 来计算:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\gamma}, \quad (1)$$

其中,  $\epsilon$  是相对介电常数;  $\epsilon_{\infty} = 3.1$ , 是频率无限大的金属介电常数;  $\omega_p = 140 \times 10^{14}$  rad/s, 是体等离子频率;  $\gamma = 0.31 \times 10^{14}$  rad/s, 是阻尼系数. 时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 被用来进行仿真模拟计算. 入射波长固定在 1550 nm, 液体媒质对应的的折射率为 1.3776<sup>[26]</sup>, SiO<sub>2</sub> 和 Si 对应的折射率分别为 1.4682 和 3.476<sup>[27–29]</sup>. 在下面的分析中, 将中心 Si 纳米线的宽度  $W_{Si}$  固定在 50 nm, 而将包裹硅纳米线的银纳米线宽度  $W_{Ag}$

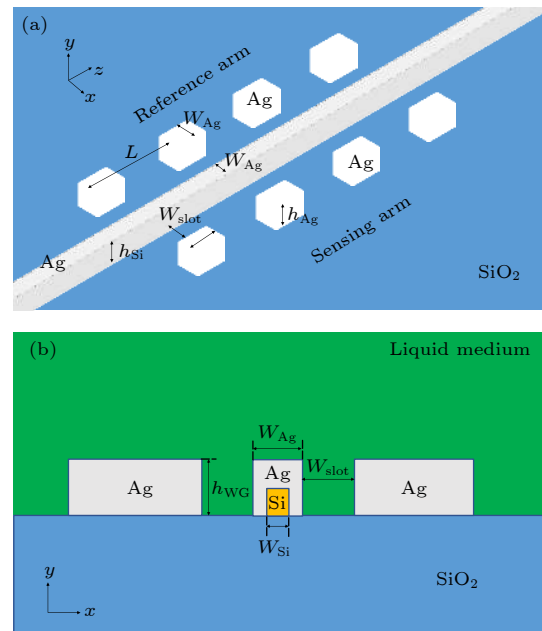


图 1 (a) 传感结构示意图; (b) 覆盖于液体媒质值中的传感结构横截面图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the sensing structure; (b) cross-sectional view of the sensing structure covered.

分取 100, 200, 300 和 400 nm. 占空比  $r_i$  从 0.1 变到 1, 步长为 0.1, 用  $L$  来表示晶格常数  $L_1$  和  $L_2$  的较大值. 光源位置距离银纳米链第一个结构距离为半个波长, 记录截面在银纳米链的末端位置处 (距离银纳米链始端为  $NL$ ). 单位长度的损耗被定义为

$$\delta = -10 \lg \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 NL} \right), \quad (2)$$

单位长度的损耗单位是 dB. 其中  $T_1$  和  $T_2$  分别是没有或有银纳米颗粒链的结构中监视器测得的透射率.  $(T_1 - T_2)/T_1$  就是计算损耗, 对计算结果取对数、负号等优化, 使单位长度损耗的计算结果更为清晰.

### 3 结果和讨论

在下面的讨论中, 主要关注晶格常数对传输损耗的影响. 分别研究两条银纳米颗粒链在晶格常数相同与不同的情况下, 单位长度的损耗  $\delta$  随占空比  $r_i$  的变化规律.

#### 3.1 在晶格常数相同的情况下单位长度的损耗

设定这两个纳米颗粒链有相同占空比  $r_1 = r_2$  和相同的晶格常数, 其中  $L_1 = L_2$  分别为 600, 775, 1310 和 1550 nm. 单位长度损耗  $\delta$  和 4 种不同

的波导宽度下占空比的曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 在银包硅波导宽度固定的条件下, 晶格常数  $L_1$  ( $L_2$ ) 接近入射波长时, 单位长度的损耗  $\delta$  都在减小. 这意味着, 光栅中 SPPs 模式很好地被激发. 这是由于<sup>[30]</sup>:

$$\begin{aligned} k_{\text{SPPs}} &= 2\pi m/L_i + k_0 \sin \theta, \\ m &= 1, 2, 3 \dots, i = 1, 2, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\theta$  是入射角,  $k_{\text{SPPs}}$  和  $k_0$  分别是银纳米链中 SPPs 的波矢量与真空中的波矢. 计算过程中, 设置入射光源平行于传感器表面入射, 所以  $\theta$  始终等于  $90^\circ$ , 与  $\theta$  变化无关. 当晶格常数接近入射波长时, SPPs 模式容易出现在本文提出的结构中. 由于晶格常数与入射波长不匹配, SPPs 模式不能被很好地激发, 损耗会增大. 与此同时, 占空比  $r_i$  对  $\delta$  也有着较大影响.  $\delta$  随占空比呈现出振荡趋势, 如图 2(a) 中  $W_{\text{Ag}} = 300$  nm 这样的曲线. 每条银纳米粒子链的有效折射率可以简单地描述为

$$n_{\text{eff,Ag\_chain}} = r_i n_{\text{Ag}} + (1 - r_i) n_{\text{bg}}, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

其中,  $n_{\text{Ag}} = \sqrt{\varepsilon}$ ,  $n_{\text{bg}}$  为背景折射率. 单位长度损耗  $\delta$  与  $n_{\text{eff}}$  的虚部  $u(W_{\text{Si}})$  有关, 是 SPPs 结构中传播的相位. 根据行波解的特点, 单位长度的损耗  $\delta$  正比于  $\cos(uk_0)$ , 随着占空比的增加, 单位长度损耗呈现周期性振荡.

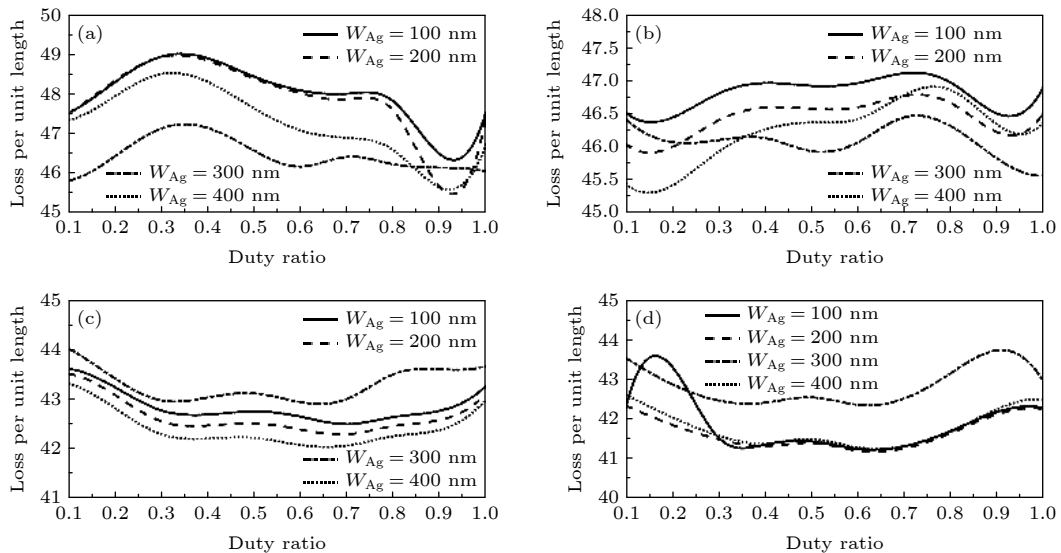


图 2 波导宽度分别为  $W_{\text{Ag}} = 100, 200, 300$  和  $400$  nm, Ag 纳米颗粒链晶格常数 ( $L_1 = L_2$ ) 取不同值时, 单位长度低损耗和占空比之间的关系 (a) 600 nm; (b) 775 nm; (c) 1310 nm; (d) 1550 nm

Fig. 2. Loss per unit length versus duty ratio for four widths  $W_{\text{Ag}} = 100, 200, 300$  and  $400$  nm with different values of  $L_1 = L_2$ : (a) 600 nm; (b) 775 nm; (c) 1310 nm; (d) 1550 nm.

在入射波长与银包硅波导宽度固定的情况下, 单位长度损耗  $\delta$  随占空比  $r_i$  的增加呈现非单调的变化. 当  $r_i$  增加时, 结构中银的含量增加. 这将导致光在整个结构传输过程中的损耗增加. 以图 2(a) 中的曲线为例, 可以看到  $\delta$  很明显地随  $r_i$  呈非单调变化. 这说明银包硅波导与两条纳米链之间有相互作用, 且这个作用增强了传输特性. 在传统的理解中, 银纳米线有很好的传输特性. 在本文设计的结构中, 当  $r_i$  为 1 时, 两条纳米链就变成了纳米线, 文献 [14] 也选择这样的银纳米线作为辅助传输结构. 这两根纳米线对银包硅波导的传输并没有起到预期的增强效果. 相反银纳米链在特定的占空比  $r_i$  下对硅-银纳米线波导起到了再次增强传输的特点. 以图 2(a)  $W_{\text{Ag}} = 200$  nm 的曲线为例, 可以知道  $\delta_{R_i=0.9} \approx \delta_{R_i=1}/10$ , 也就是说在特定的占空比下, 纳米链的辅助传输性能优于纳米线的.

在入射波长与占空比固定的情况下, 增加覆盖在硅纳米线上银的体积, 单位长度的损耗  $\delta$  随银体积  $W_{\text{Ag}}$  增加呈现非单调变化. 这是由包裹硅的银纳米线杂化波导与两条银纳米链相互作用与银本身损耗之间的竞争关系导致的. 随着银的增加, 包裹硅的银纳米线杂化波导基模的损耗会降低, 但是银本身的损耗在增加. 所以, 随着覆盖硅纳米线上的银体积的增加,  $\delta$  呈现振荡下降的情况. 通过比较两条纳米链和两条银条的这两种结构, 可以发现在

某些条件下, 两条 Ag 纳米链的结构具有较低的单位长度损耗  $\delta$ , 如  $L_1 = L_2 = 1550$  nm,  $r_1 = r_2 = 0.6$ ,  $W_{\text{Si}} = 400$  nm. 这表明长程相互作用 (如库仑相互作用) 在 SPPs 的形成中起着重要的作用. 纳米颗粒之间的相互作用与  $(NL)^2$  有关, 最后一个纳米颗粒也参与了相互作用 [34]. 因此, 在一定条件下, 包含纳米颗粒的结构下的单位长度的损耗  $\delta$  要小于含两条银条的结构下的  $\delta$ .

### 3.2 在非对称结构下单位长度的损耗

为了进一步优化传感器模型的设计, 讨论了非对称的结构以进一步探索降低单位长度的损耗  $\delta$  的条件. 本节研究了两种不对称结构: 一种是在结构中的两侧银纳米粒子链有不同的晶格常数 (即  $L_1 \neq L_2$ ), 另一种是原结构中的一侧为银纳米链而另一侧为银纳米线结构. 入射波长仍然固定在 1550 nm. 包裹硅纳米线的银纳米线宽度从 100 nm 增加到 400 nm.

#### 3.2.1 两侧 Ag 纳米粒子链晶格常数不同的非对称结构

首先选取两个晶格常数分别为  $L_1 = 1310$  nm 与  $L_2 = 1550$  nm. 为了对比性能, 也计算了  $L_1 = L_2 = 1310$  nm 与  $L_1 = L_2 = 1550$  nm 的情况. 得到的曲线如图 3 所示. 从图 3 可以看到, 在  $W_{\text{Ag}} = 300$  和 400 nm 时, 银纳米链在某些占空比的情况

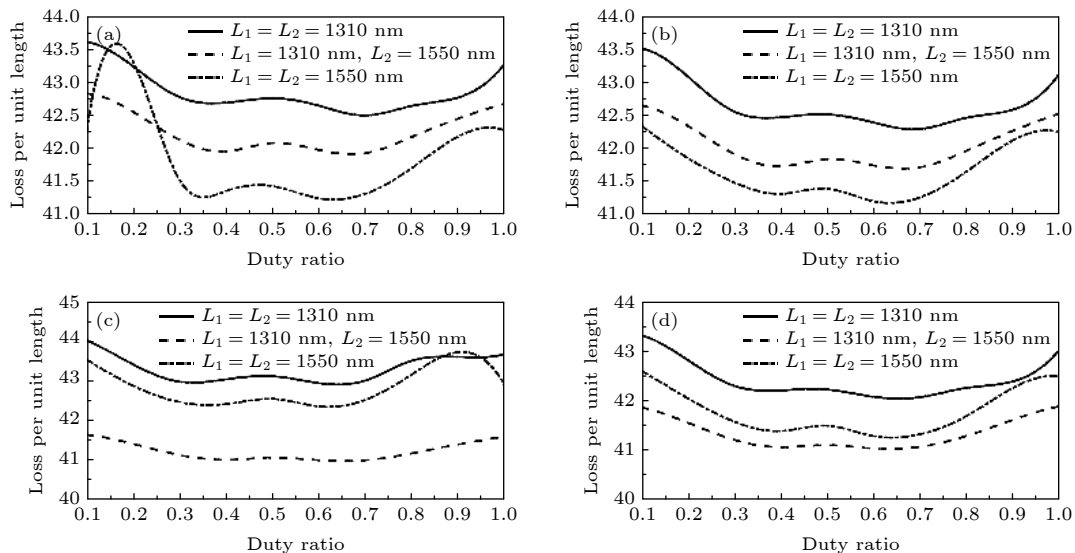


图 3 非对称结构下, 包裹着 Si 纳米线的 Ag 纳米线宽度不同时单位长度的损耗与占空比之间的关系 (a)  $W_{\text{Ag}} = 100$  nm; (b)  $W_{\text{Ag}} = 200$  nm; (c)  $W_{\text{Ag}} = 300$  nm; (d)  $W_{\text{Ag}} = 400$  nm

Fig. 3. Loss per unit length versus the duty ratio for the asymmetric structure with different width of Ag nanowire: (a)  $W_{\text{Ag}} = 100$  nm; (b)  $W_{\text{Ag}} = 200$  nm; (c)  $W_{\text{Ag}} = 300$  nm; (d)  $W_{\text{Ag}} = 400$  nm.

下,非对称结构的单位传输损耗小于对称结构的.也就是说由于此差异的存在使得传输变得更好.这主要是由于以上那些占空比下的银颗粒在与银包硅纳米线相互作用后产生的光进一步干涉加强,使得耗散的光减弱,进而使得传输增强,损耗降低.当  $W_{Ag} = 100$  和  $200$  nm 时,由于银包硅纳米波导结构的损耗增加,使得非对称结构的单位长度损耗介于两种对称结构的中间.这说明,在损耗较大的情况,非对称结构能够减小损耗,如  $(L_1, L_2) = (1310 \text{ nm}, 1310 \text{ nm})$  与  $(1310 \text{ nm}, 1550 \text{ nm})$  这两组.但在损耗较小的情况下,非对称结构能够增加损耗,比如  $(L_1, L_2) = (1310 \text{ nm}, 1550 \text{ nm})$  与  $(1550 \text{ nm}, 1550 \text{ nm})$ .

增加两条银纳米链的不匹配度,也就是增加  $|L_1 - L_2|$  的值来考查传输特性.分别取  $(L_1, L_2) = (775 \text{ nm}, 1550 \text{ nm})$  和  $(600 \text{ nm}, 1550 \text{ nm})$ ,得到的曲线如图 4 所示.可以看出,随着  $|L_1 - L_2|$  的增加,晶格常数小的银纳米链损耗增加.而晶格常数大的由于贴近入射波长,损耗较小.由于结构中的银纳米颗粒链的损耗增加,在  $W_{Ag} = 300$  nm 的非

对称结构中,损耗小的银纳米颗粒链增强能力有限.因此可以知道,不匹配度增大,非对称结构传输效果变差.此时,非对称结构传输性能介于两个对称结构之间.

从上述分析可以看出,在特定的占空比下,当两条银纳米链的晶格常数有微小差别时,不仅不会减弱所设计的基于 SPPs 的 MZI 传感器的性能,还能减小这类器件的传输损耗.使得器件在制备过程中容错率大大提高.

### 3.2.2 在非对称结构中一侧为银纳米颗粒链一侧为银条的结构

根据上述讨论可以知道,在某些占空比情况下具有小损耗的银纳米颗粒链可以弥补大损耗的银纳米颗粒链的损失.根据这样的结果,用银纳米线替代第二条银纳米链 ( $r_2 = 1$ ),令  $r_1$  从 0.1 逐渐增大为 1,使得一边形成稳定的波导模式,另一边探索减小损耗的晶格常数与占空比.选择银纳米链的晶格常数分别为 600, 775, 1310 和 1550 nm.也计算了两侧为完全相同的银纳米链结构作为对比.

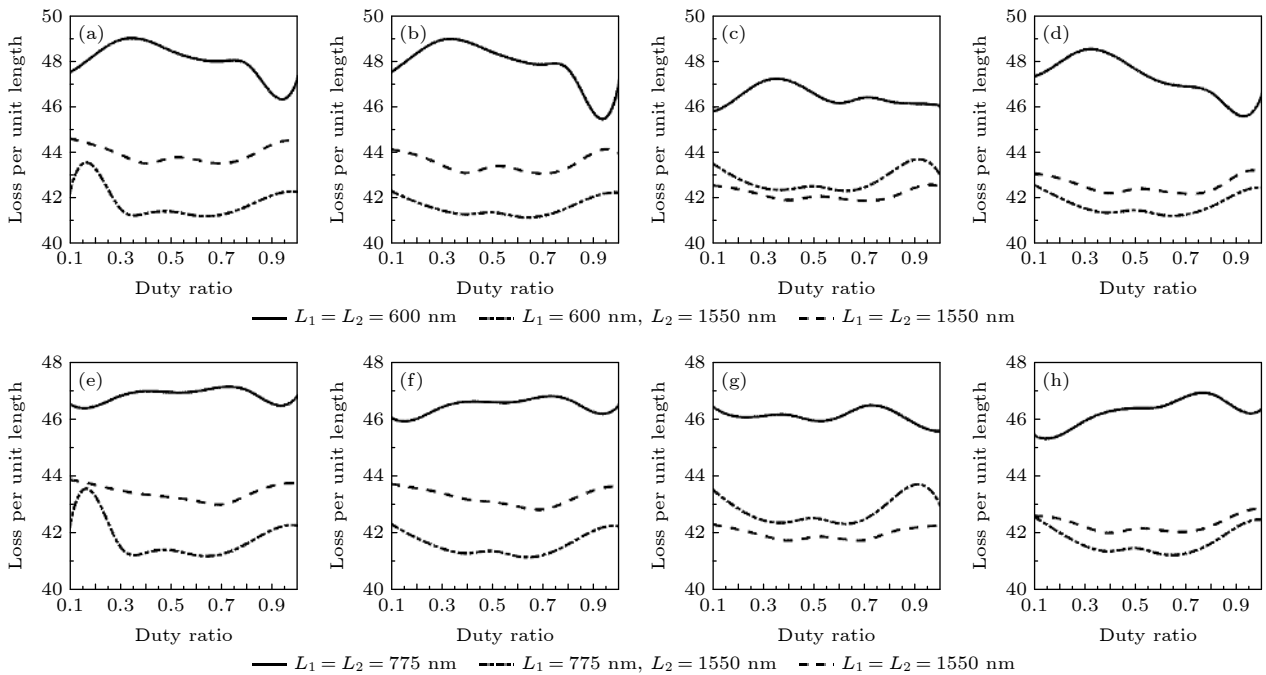


图 4 非对称结构下,包裹着 Si 纳米线的 Ag 纳米线宽度不同时单位长度的损耗与占空比之间的关系 (a), (e)  $W_{Ag} = 100$  nm; (b), (f)  $W_{Ag} = 200$  nm; (c), (g)  $W_{Ag} = 300$  nm; (d), (h)  $W_{Ag} = 400$  nm. 银纳米粒子链的晶格常数分别为 (a)–(d)  $L_1 = L_2 = 600$  nm,  $L_1 = 600$  nm,  $L_2 = 1550$  nm 和  $L_1 = L_2 = 1550$  nm; (e)–(h)  $L_1 = L_2 = 775$  nm,  $L_1 = 775$  nm,  $L_2 = 1550$  nm 和  $L_1 = L_2 = 1550$  nm

Fig. 4. Loss per unit length versus the duty ratio for the asymmetric structure with different width of Ag nanowire: (a), (e)  $W_{Ag} = 100$  nm; (b), (f)  $W_{Ag} = 200$  nm; (c), (g)  $W_{Ag} = 300$  nm; (d), (h)  $W_{Ag} = 400$  nm. The lattice constants of Ag nanoparticle chain are considered as: (a)–(d)  $L_1 = L_2 = 775$  nm,  $L_1 = 775$  nm,  $L_2 = 1550$  nm, and  $L_1 = L_2 = 1550$  nm; (e)–(h)  $L_1 = L_2 = 1310$  nm,  $L_1 = 1310$  nm,  $L_2 = 1550$  nm, and  $L_1 = L_2 = 1550$  nm.

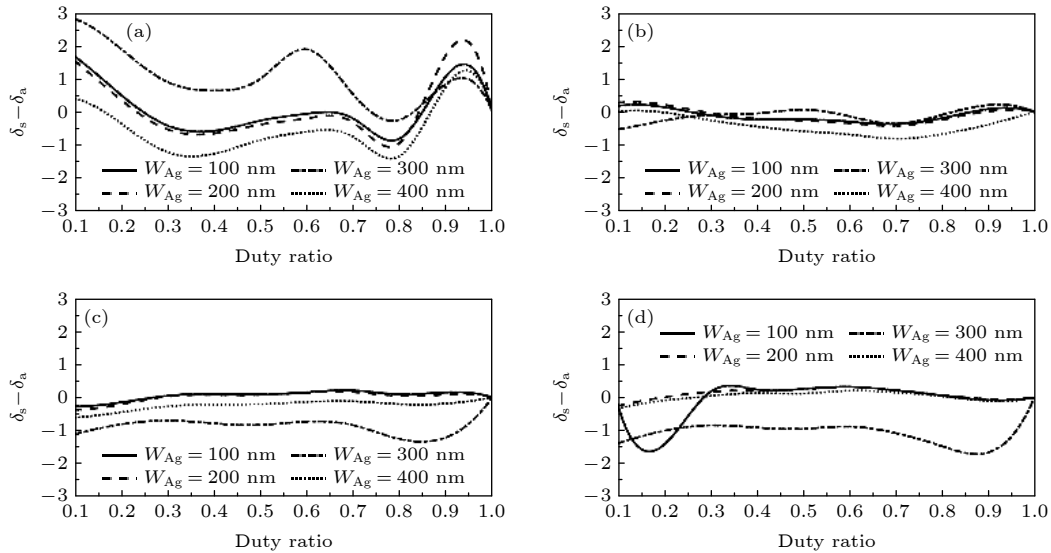


图 5 晶格常数  $L$  取不同值时, 单位长度的损耗与占空比  $r_1$  之间的关系 (a)  $L = 600$  nm; (b)  $L = 775$  nm; (c)  $L = 1310$  nm; (d)  $L = 1550$  nm. 实线表示非对称结构, 虚线表示对称结构. 这里设置  $r_2$  为 1

Fig. 5. Loss per unit length  $\delta$  versus  $r_1$  with different lattice constants: (a)  $L = 600$  nm; (b)  $L = 775$  nm; (c)  $L = 1310$  nm; (d)  $L = 1550$  nm. The solid line presents the the asymmetric structure and the dash line is the symmetric structure. Here,  $r_2$  is fixed at 1.

共计算了 4 种不同的波导宽度下对称结构与非对称结构的单位长度损耗差值 ( $\delta_s - \delta_a$ ) 随占空比的变化曲线, 计算结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 大多数曲线上的值都大于 0, 也就说明这样一个非对称结构能够明显提升本文所设计结构的传输能力. 这样与上述的预言更加符合. 与此同时, 本文的研究在实验中具有潜在的应用价值. 不仅为探索一种基于 SPPs 的 MZI 传感器提供了一套参数, 而且在实验的样品制作中表现出了很高的容错性.

在生物传感领域, 金的生物相容性要优于银, 游离的银离子会对生物体产生毒性. 但是我们在把银材料替换为金材料后发现, 在金纳米结构下计算得到的损耗要超出银纳米结构一个量级以上, 使得传感器性能下降.

## 4 总 结

本文探索了一种新型的基于 SPPs 的 MZI 传感器, 减小传感器中的传输损耗. 在优化之前文献报导的结构中, 引入了银纳米颗粒链来代替银棒, 并考虑银纳米链的晶格常数和占空比对单位长度损耗  $\delta$  的影响. 通过对比发现, 银纳米链的引入可以增强光在所设计结构中的传输特性, 减小单位长度的传输损耗. 这说明银纳米颗粒之间的长程相互作用有助于减小光传输的损耗. 为进一步探索减小

损耗的结构, 将两条银纳米链的晶格常数设置成不同值. 经过计算发现, 在特定占空比的情况下, 当  $W_{Ag}$  大于 200 nm 时非对称结构传输特性优于对称结构. 由此可以知道, 具有小损耗的银纳米颗粒链可以弥补大损耗的银纳米颗粒链的损失. 利用这个特点, 进一步优化设计结构, 将一侧银纳米链改为纳米线. 改变另一侧银纳米链的晶格常数与占空比, 发现大多数情况下, 这类结构传输特性优于含有两条银纳米链的结构. 本文的研究在实验中有潜在的应用价值, 可以设计一个高容错、低损耗的基于 SPPs 的高灵敏 MZI 传感器.

## 参考文献

- [1] Luan X G, Xu X M, Li M, Yu R, Cheng L F 2020 *J. Alloys Compd.* **850** 156782
- [2] Teng C X, Deng S J, Deng H C, Yang H Y, Xu Y H, Yuan L B, Zheng J, Liu H Q 2019 *Opt. Eng.* **58** 072002
- [3] Omair Z, Talukder M A 2019 *Plasmonics* **6**
- [4] Yamashita T, Ookawa N, Ishida M, Kanamori H, Sasaki H, Katayose Y, Yokoyama H 2016 *Sci. Rep.* **6** 38552
- [5] Sepulveda B, Rio J S D, Moreno M, Blanco F J, Mayora K, Dominguez C, Lechuga L M 2006 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** S561
- [6] Ghosh S, Rahman B 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 3003
- [7] Ayoub A B, Ji D, Gan Q, Swillam, Mohamed A 2018 *Opt. Commun.* **427** 219
- [8] Liu F, Li Y X, Huang Y D 2017 *Acta Phys. Sin.* **14** 148101 (in Chinese) [刘仿, 李云翔, 黄翊东 2017 *物理学报* **14** 148101]
- [9] Ma Y Q, Nguyen-Huu N, Zhou J, Maeda H, Wu Q, Eldlio M, Pistora J, Cada M 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quantum* **99** 1
- [10] Stefan A M 2007 *Plasmonics-Fundamentals and Applications*

- (London: Springer US) p45
- [11] Hao J, Sabarinathan J 2010 *Vestn Akad Med Nauk SSSR* **114** 38
- [12] Mirzanejhad S, Ghadi A, Daraei M E 2018 *Physica B* **557** 141
- [13] Gan Q Q, Gao Y K, Bartoli F J 2009 *Opt. Express* **17** 20747
- [14] Sun X, Dai D X, Lars T, Wosinski L 2015 *Opt. Express* **23** 8
- [15] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nat. Photonics* **2** 496
- [16] Chen C, Xun H, Jimhai S 2019 *Opt. Express* **25** 31294
- [17] Ghosh S, Rahman B M A 2019 *Journal of Physics Conference Malacca, Malaysia*, July 23-25, 2018 p012012
- [18] Osowiecki G D, Barakat E, Naqavi A, Herzig H P 2014 *Opt. Express* **22** 20871
- [19] Liu W X, Yan J L, Shi Y C 2017 *Opt. Express* **25** 31739
- [20] Li S Y, Tian J F, Yang C, Zuo G H, Zhang Y C, Zhang T C 2018 *Acta Phys. Sin.* **23** 234202 (in Chinese) [李诗宇, 田剑锋, 杨晨, 左冠华, 张玉驰, 张天才 2018 物理学报 **23** 234202]
- [21] Chen J N 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024212 (in Chinese) [程君妮 2018 物理学报 **67** 024212]
- [22] Patel P B, Hamde S T 2017 *J. Opt.* **46** 398
- [23] Wang F, Cheng Y K, Li C Q, Ma T, Lu Y H, Liu H, Jin C 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 224201 (in Chinese) [王芳, 陈亚珂, 李传强, 马涛, 卢颖慧, 刘恒, 金婵 2021 物理学报 **70** 224201]
- [24] Shi Y C, Dai D X, He S L, Sun M 2006 CN1731149A (in Chinese)[时尧成, 戴道锌, 何赛灵, 孙森 2006 CN1731149A]
- [25] Liu N, Langguth L, Weiss T, Kstel J, Fleischhauer M, Pfau T, Giessen H 2009 *Nat. Mater.* **8** 758
- [26] Hodgman C 1924 *Handbook of Chemistry and Physics* (Los Angeles: CRC Press) p22
- [27] Aspnes D, EStudna A A 1983 *Phys. Rev. B* **27** 985
- [28] Malitson I H 1965 *J. Opt. Soc. Am* **55** 1205
- [29] Chen F, Zhang H F, Sun L H, L J J, Yu C C 2019 *Opt. Laser Technol.* **116** 293
- [30] Stefan A M 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (London: Springer US) p45
- [31] Song G, Zhang W 2016 *Plasmonics* **12** 1



# Biosensor based on plasmonic Mach-Zehnder interferometer with metallic gratings<sup>\*</sup>

Wang Kun    Duan Gao-Yan    Lang Pei-Lin    Zhao Yu-Fang  
Liu Jian-Bin    Song Gang<sup>†</sup>

(*School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

( Received 2 August 2021; revised manuscript received 8 September 2021 )

## Abstract

In this paper, a Mach-Zehnder interferometric sensing structure based on silver nanochains of surface plasmons is optimized. The structure consists of a reference arm, a sensing arm and a nanowire waveguide. Nanowire waveguides are composed of silicon nanowires wrapped with a certain thickness of silver. Introduce two silver nanochains as the reference arm and the sensing arm of the Mach-Zehnder interferometer. And research the transmission characteristics of the designed structure. Improve the accuracy and sensitivity of the designed structure by reducing the transmission loss. Compared with two identical silver nanowires as the reference arm and the sensing arm. After the reference arm and the sensing arm are changed to silver nanochains, the transmission characteristics are significantly improved, and the loss per unit length is obviously reduced. This is because the long-range or coulomb interaction between the unit structures of the silver nanochains enhances the electromagnetic field in the structure, thereby reducing the transmission loss. We set the lattice constants of the two silver nanochains to different situations. The study found that under the wider width of silicon-coated silver nanowires and certain duty ratios. The unit transmission loss of a structure containing asymmetric silver nanochains is smaller than that of a structure containing symmetric silver nanochains. It can be known that silver nanoparticle chains with small loss can compensate for the transmission loss of silver nanoparticle chains with large loss. Using this feature, we further optimized the design structure and changed one side of the silver nano-chain to nano-wire. Change the lattice constant and duty cycle of the silver nanochain on the other side. We have found that in most cases, this type of structure has better transmission characteristics than a structure containing two silver nanochains and a structure containing two silver nanowires. Our design structure can greatly reduce the transmission loss of the traditional Mach-Zehnder interferometer. Moreover, the fault tolerance rate is high in the preparation process of the structure. It has huge potential application value in practical application.

**Keywords:** sensor, SPPs, Mach-Zehnder interferometers

**PACS:** 73.20.Mf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211420

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.11604020).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [sg2010@bupt.edu.cn](mailto:sg2010@bupt.edu.cn)