

## 基于周期性光栅结构的表面等离子激元探测

计吉焘, 翟雨生, 吴志鹏, 马祥宇, 穆慧惠, 王琦龙

引用本文:

计吉焘, 翟雨生, 吴志鹏, 等. 基于周期性光栅结构的表面等离子激元探测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 526–534.

Ji Ji-tao, ZHAI Yu-sheng, WU Zhi-peng, et al. Detection of surface plasmons based on periodic grating structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 526–534.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0526>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于等离子激元热电子效应的光电晶体管制备及其特性

Fabrication and properties of plasmonic hot-electron phototransistor

*光学精密工程*. 2018, 26(3): 517–522 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182603.0517>

### 多谐振U形缝隙纳米天线设计及吸收特性

Design of multi resonant U shaped slots nano-antenna and their absorption properties

*光学精密工程*. 2017, 25(8): 2155–2164 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2155>

### 像素级光学滤波-探测集成器件的研究进展

Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging

*光学精密工程*. 2019, 27(5): 999–1012 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192705.0999>

### 利用Ag/P-GaN双光栅改善LED发光特性

Improving LED luminescence properties by using Ag/P-GaN double grating

*光学精密工程*. 2017, 25(5): 1185–1191 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1185>

### 空间相机温度-离焦特性分析与试验

Study and test of thermal-defocusing property in space camera

*光学精密工程*. 2017, 25(7): 1825–1831 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1825>

文章编号 1004-924X(2020)03-0526-09

# 基于周期性光栅结构的表面等离子激元探测

计吉焘, 翟雨生, 吴志鹏, 马祥宇, 穆慧惠, 王琦龙\*

(东南大学 电子科学与工程学院 信息显示与可视化国际合作实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 表面等离子激元具有突破光学衍射极限、局域场增强等特点, 有望代替电子和光子作为信号载体, 综合光学系统的高带宽特性与电子系统的紧凑性, 构建新一代高速、高集成化的光电集成电路。为了有效探测表面等离子激元, 基于时域有限差分法提出一种基于周期性光栅的平面型表面等离子激元探测结构模型, 其中包括耦合光栅、条形波导以及探测光栅。首先简要阐述了探测结构的工作原理, 并建立了工作在 670, 1 310 和 1 550 nm 波段的仿真模型; 同时研究等离子激元耦合效率随入射光偏振角度的变化以及等离子激元吸收率与波导长度的关系; 最后实验制备了相应的表面等离子激元探测结构。结果表明: 表面等离子激元的耦合效率与偏振角度成余弦平方关系; 在 670 nm 波段, 吸收率在波导长度为 5  $\mu\text{m}$  的条件下为 4.3%, 衰减长度为 17.1  $\mu\text{m}$ , 与表面等离子激元传播长度的理论值 17.5  $\mu\text{m}$  基本吻合; 实验测得的光电流随偏振角度的变化趋势与仿真的吸收率变化趋势一致, 证实了上述模型能够实现对表面等离子激元的有效探测。所提出的表面等离子激元探测结构模型为将来高速、集成化的新型光电集成电路提供了理论和实验基础。

**关键词:** 光电器件; 表面等离子激元; 周期性光栅; 光电集成电路

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0526

## Detection of surface plasmons based on periodic grating structure

JI Ji-tao, ZHAI Yu-sheng, WU Zhi-peng, MA Xiang-yu, MU Hui-hui, WANG Qi-long\*

(Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization,  
School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

\* Corresponding author, E-mail: northrockwql@seu.edu.cn

**Abstract:** Owing to the ability of surface plasmons to circumvent the optical diffraction limit and ultra-fast transmission speed, they are expected to replace electrons and photons as signal carriers in the construction of next-generation high-speed, highly integrated optoelectronic integrated circuits. They can integrate the high bandwidth characteristics of the optical system with the compactness of the electronic system. However, the detection of surface plasmons is difficult. In this study, a simulation model that includes a grating coupler, strip waveguide, and detecting grating was established based on the finite-difference time-domain method for detection surface plasmons both in the visible and optical-communication bands. We first analyzed the operation principle of the proposed detection structure and established three simulation models operating at 670, 1310, and 1 550 nm. Next, the relationship between the coupling efficiency and polarization angle of the incident light was analyzed along with that between the absorption efficiency and waveguide length. Finally, the detection structure was

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61805037, No. U1730113); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目、中国博士后科学基金资助项目 (No. 2019M651645); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20171365)

experimentally prepared according to the simulation models. The results reveal that the coupling efficiency exhibits a cosine squared relation with the polarization angle. In the case of a 5- $\mu\text{m}$  waveguide, the absorption efficiency is 4.3% at 670 nm and its attenuation length is calculated as 17.1  $\mu\text{m}$ , which is consistent with the theoretical value of the propagation length (17.5  $\mu\text{m}$ ). Furthermore, the variation trend of the photocurrent with polarization angle obtained through experiments matched with the absorption efficiency in simulations. The detection structure is proved to effectively detect the surface plasmons. The proposed models for detecting surface plasmons provide theoretical and experimental bases for future high-speed and integrated plasmonic interconnect circuits.

**Key words:** photoelectric devices; surface plasmons; periodic gratings; optoelectronic integrated circuits

## 1 引言

光电集成电路 (Optoelectronic Integrated Circuits, OEIC) 的工作带宽远大于电子电路, 拥有电子电路无法比拟的信息处理能力, 能够有效解决集成电路的速率瓶颈问题。然而, 受到光学衍射极限的限制, 传统光学元件的有效尺寸在微米级别, 难以实现高度集成化。同时, 光学器件与电子器件间严重的尺寸失配, 使得两者难以实现真正意义的互联。因此, 如何突破传统光学器件衍射极限, 实现小型化和集成化的光电互联, 成为光电集成电路中亟待解决的问题<sup>[1-2]</sup>。

表面等离子激元作为一种在金属/介质界面传播的电子疏密波, 具有局域电场增强的特性, 能够突破传统光学的衍射极限, 是目前光电集成电路领域的重要发展方向之一<sup>[3-5]</sup>。以表面等离子激元作为信号载体的表面等离子激元器件能够有效结合纳米电子学的紧凑性与光学器件的高带宽特性, 有望构建新型的高速、高集成化的光电集成电路<sup>[6-9]</sup>。表面等离子激元探测器作为信号读出器件, 是构建以等离子激元为信号载体的光电集成电路中必不可少的部分。目前, 表面等离子激元的探测主要通过近场扫描显微镜、荧光成像、泄露模显微镜成像等光学观测方法实现<sup>[10-11]</sup>。然而, 对于上述新型的光电集成电路而言, 需要将等离子激元信号有效转化为电学信号, 与电学元件相集成, 因而需要通过输出电信号的形式来探测表面等离子激元。

由于等离子激元作为信息载体在传输带宽、器件集成度上的巨大优势, 等离子激元探测器受到了科研人员的广泛关注, 多种等离子激元信号探测结构已经被提出。相关研究将表面等离子激元波导与

金属-半导体-金属 (Metal Semiconductor Metal, MSM) 探测结构相结合, 利用 MSM 探测结构将在波导中传播的表面等离子激元信号散射或近场耦合到探测结构的半导体层中, 通过半导体层对等离子激元信号的吸收来产生电信号。比利时鲁汶大学 Pieter Neutens 课题组利用 Au/GaAs/Au 构成的 MSM 探测结构, 实现了对 MIM 表面等离子激元波导中传输的等离子激元的探测<sup>[13]</sup>。然而, 该器件的制备过程涉及多次金属层和半导体层的沉积与外延, 工艺要求较高, 同时, MSM 探测器与 MIM 波导构成的垂直型结构不利于器件与外围电路相集成。法国贝桑松大学的研究人员利用金属纳米圆盘线阵列作为光学发射天线, 将入射激光耦合成表面等离子激元信号, 并将其传输进入金/间隙/金隧道结 (MIM) 的整流天线中, 利用等离子激元引入的电场引起隧道电流变化来探测等离子激元<sup>[12]</sup>。尽管如此, MIM 隧道结的制备需要多次光刻来实现, 并且隧道结的间隙需要通过电迁移法控制到 1 nm 以内, 器件的制备极其复杂并且难以控制。除了上述利用集成波导的 MSM 探测结构和 MIM 隧道结结构, 还有不少研究利用二维材料如二硫化钼<sup>[14]</sup>、石墨烯<sup>[15]</sup>等与金属纳米线相结合实现对表面等离子激元的探测。尽管二维材料具有较高的载流子迁移率, 在一定程度上能够提高响应速度及载流子的输运效率, 但二维材料与金属纳米线形成的探测结构的均一性无法保证, 并且其对准工艺要求严苛, 难以与 CMOS 工艺兼容。

综上所述, 上述三种探测结构尽管都从原理验证角度实现了对等离子激元信号的探测, 但是由于器件结构和制备工艺的复杂性, 无法与现有的硅基电子电路相结合, 充分发挥等离子激元在信号

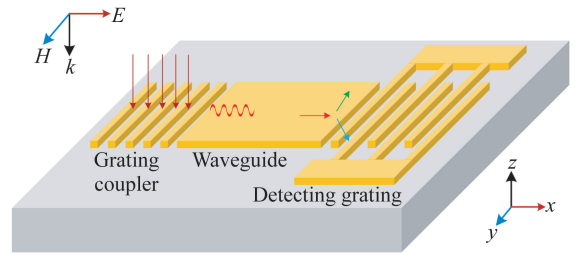
传输和数据处理中的优势。因此,设计 CMOS 工艺兼容的、易于制备的新型表面等离子元探测结构是急需解决的问题之一。

周期性金属光栅由于结构简单、耦合效率高、易于制备、共振波长可调节等特点,被广泛应用于表面等离子元的耦合与散射。本文设计并制备了一种基于周期性光栅的平面型表面等离子元探测结构,利用耦合光栅、条形波导以及探测光栅结构分别激发、传输和探测表面等离子元。首先,通过优化耦合光栅、探测光栅以及波导的相关结构参数,得到了在可见光及光通信波段的等离子元探测模型。然后,利用微纳加工工艺制备了可见光波段的探测结构,通过实验验证上述仿真模型的正确性。所提出的平面型表面等离子元探测器结构简单,制备工艺与传统 CMOS 工艺兼容,为表面等离子元探测器的制备及结构优化提供了可靠的依据。

## 2 基于周期性光栅的探测结构模型

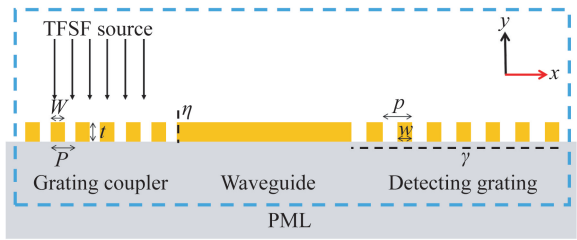
### 2.1 可见光波段探测模型设置

基于周期性光栅的表面等离子元探测结构如图 1(a)所示,其中一端为耦合光栅,另一端为探测光栅,中间通过条形波导相连接,基底材料为硅。本文采取二维模拟,即对探测结构的  $x-z$  平面进行仿真,结构如图 1(b)所示。在可见光波段(670 nm),耦合光栅模型参数设置如下:周期  $P=630$  nm,光栅宽度  $W=300$  nm,厚度  $t=80$  nm;波导结构为条形金波导,长度  $L=5$   $\mu\text{m}$ ,厚度  $t=80$  nm;探测光栅的周期  $p=600$  nm,宽度  $w=300$  nm,厚度  $t=80$  nm。采用全场散射场光源(TFSF)作为入射光源,光源波长为  $400\sim 1\ 000$  nm,沿  $z$  轴负轴方向入射,偏振方向为  $x$  轴方向。仿真区域中  $x$  轴、 $z$  轴边界条件均设置为完美吸收边界条件,网格精度为 5 nm。功率监视器的位置如图 1(b)中的虚线所示,其中,耦合效率为  $\eta$  的监视器设置在耦合光栅与条形波导的交接处,方向沿  $z$  轴;吸收率为  $\eta$  的监视器位于探测光栅与硅基底的界面处,方向沿  $x$  轴,由波导末端至探测光栅末端,计算由探测光栅引起的散射进入硅基底的光功率。模型中材料 Au 和 Si 分别采用 Johnson and Christy 实验所得结果和 Palik 实验所得结果<sup>[16-17]</sup>。



(a) 三维探测结构示意图

(a) Schematic diagram of three-dimensional detection structure



(b) 二维仿真结构示意图

(b) Two-dimensional simulation structure

图 1 等离子元探测结构的仿真模型

Fig. 1 Simulation model for surface plasmons detection

### 2.2 可见光波段探测模型的工作原理

耦合光栅是常见的表面等离子元激发结构,用于补偿表面等离子元与入射光之间的波矢失配,其耦合条件可以表示为:

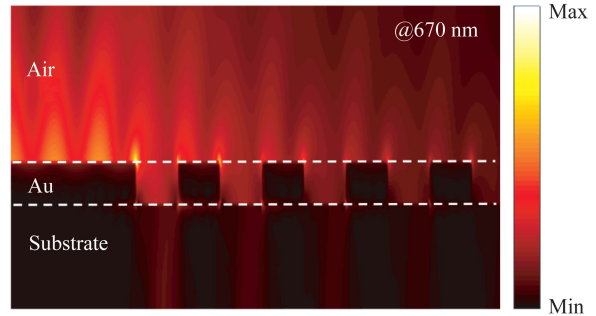
$$k_{\text{spp}} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \cdot \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_i \cdot \sin \theta + m \cdot \frac{2\pi}{P}, \quad (1)$$

其中: $k_{\text{spp}}$ 为表面等离子元波矢, $k_0$ 为介质中光的波矢, $P$ 为光栅周期, $m$ 为衍射级, $\lambda_0$ 为真空中入射光的波长, $n_i$ 为介质的折射率, $\epsilon_d$ 和 $\epsilon_m$ 分别为介质和金属的介电常数, $\theta$ 为入射光的角度。

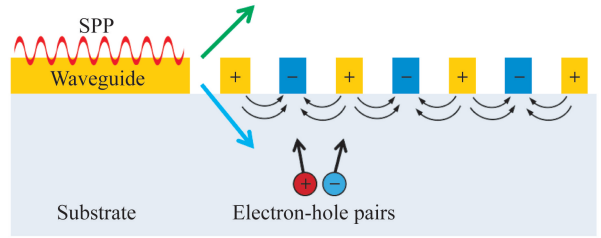
在所设计的表面等离子元探测结构中,耦合光栅补偿入射光与金-空气界面表面等离子元间的波矢失配,将入射光耦合在条形波导上传输的表面等离子元,在此定义传输到条形波导中的光功率与入射光功率的比值为光栅的耦合效率 $\eta$ 。图 2(a)为不同入射光波长条件下的耦合效率,当入射波长为 670 nm 时,耦合效率达到最高值 7.8%。图 2(a)中的插图表明,电场集中在金光栅-空气界面,并且电场强度沿垂直界面的方向指数衰减,表明耦合光栅激发了金-空气界面的表面等离子元。图 2(b)展示了在 670 nm 入射条件

下,波导末端及探测光栅处的电场强度分布。当被激发的表面等离子元沿着条形波导在金-空气界面传输到波导末端时,由于波矢失配,表面等离子元被探测光栅重新解耦成自由空间的光,以光子的形式向外散射。如图 2(c)所示(彩图见期刊电子版),其中一部分被散射进入空气中(绿色箭头),另一部分被散射进入硅基底中(蓝色箭头)。由于入射光的工作波长为 670 nm,因此被散射进入基底的光直接被硅基底吸收,从而形成电子-空穴对。当在探测光栅上间隔地施加正负偏压,即探测光栅以如图 2(c)的叉指电极形式作为探测结构,所产生的电子-空穴对在外加电场的作用下能够被迅速分离,并由两端的金电极有效收集,从而产生光电流信号,实现对表面等离子元的电学探测。图 2(d)为探测光栅中一组电极的能带结构示意图,描绘了散射进入基底的光被硅吸收,产生电子空穴对并被两端金电极收集的过程。

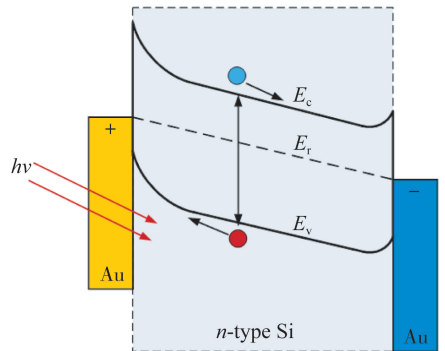
需要指出的是,利用时域有限差分法对上述探测结构进行仿真计算时,主要研究探测结构的光学特性,因而定义由探测光栅引起的散射进入硅基底的光功率与入射光功率的比值为表面等离子元的吸收率  $\gamma$ ,以  $\eta$  作为衡量该结构探测性能的参数。图 2(a)中的空心方形曲线代表表面等离子元的吸收率,其变化趋势与耦合效率一致,吸收率在 670 nm 处达到最高值 4.3%。



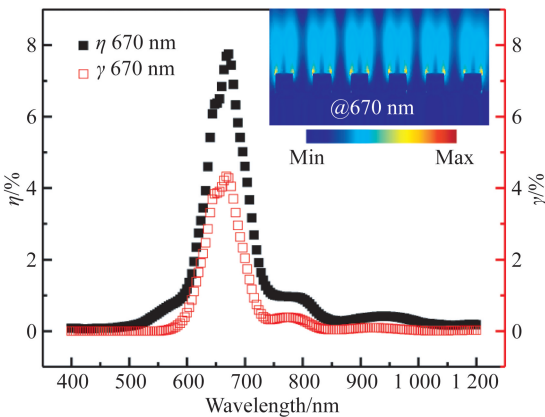
(b)波导末端及探测光栅处的电场强度分布  
(b) Normalized electric field intensity distribution at waveguide and detecting grating



(c)探测光栅探测原理示意图  
(c) Operating principle of detecting grating



(d)探测光栅能带结构示意图  
(d) Band diagram of detecting grating



(a)耦合效率及吸收率,插图:670 nm 入射条件下耦合光栅处的电场强度分布

(a) Coupling efficiency and absorption efficiency. Inset: normalized electric field intensity distribution at grating coupler at 670 nm

图 2 670 nm 波段仿真结果  
Fig. 2 Simulation results at 670 nm

### 2.3 光通信波段探测模型

针对工作在光通信波段(1 310 nm 和 1 550 nm)的仿真模型,根据周期性光栅激发条件方程(1)设计了相应的探测结构,具体结构参数如表 1 所示。采用全场散射场光源,波长为 800~1 800 nm,沿  $z$  轴负轴方向入射,偏振方向为  $x$  轴方向。考虑到硅基底无法吸收在通信波段被散射的表面等离子元,将基底材料替换为锗,材料参数采用 Palik 实验所得结果,其余仿真设置均与可见光波段一致。图 3 所示为基于上述结构参数的光通信波段探测结构对应的耦合效率及吸收率曲线。该结构

在 1 310 nm 和 1 550 nm 处的耦合效率分别达到 4.5% 和 3.7%，对应的吸收率分别为 3.2% 和 3.5%。因此，通过改变耦合光栅、探测光栅的结

构参数以及基底材料，能够将上述探测结构的工作波长调节到 1 310 和 1 550 nm 处，这为光通信波段的表面等离激元探测提供了一定的理论基础。

表 1 光通信波段探测模型的结构参数

Tab.1 Parameters of detection model in optical communication bands

Wavelength/nm	Grating coupler		Detecting grating		Waveguide length/ $\mu\text{m}$	Thickness/nm
	Period/nm	Width/nm	Period/nm	Width/nm		
1 310	1 260	700	1 000	500	5	180
1 550	1 520	800	1 500	750	5	180

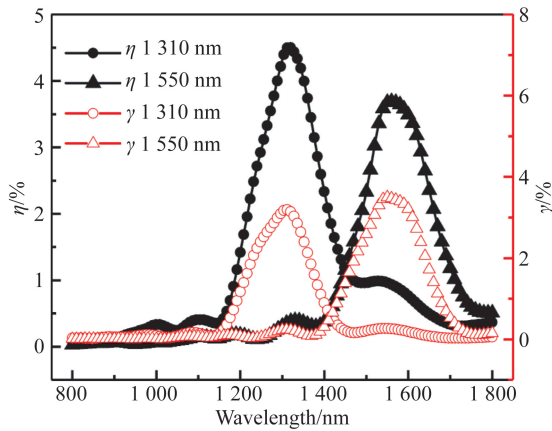


图 3 1 310 nm, 1 550 nm 波段的耦合效率及吸收率

Fig.3 Coupling efficiencies and absorption efficiencies at 1 310 nm and 1 550 nm

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 不同入射偏振条件下的耦合效率及吸收率

在周期性金属光栅结构中，表面等离激元的激发效率强烈依赖于入射光的偏振角度，因而根据入射线偏振光的偏振角度来研究光栅耦合效率及吸收率的变化，可以验证上述探测结构能否有效激发并探测表面等离激元。本节基于 2.1 节所述的可见光波段的表面等离激元探测模型，通过改变入射光偏振角度，得到如图 4 所示的耦合效率及吸收率的变化。在 670 nm 入射条件下，当入射光偏振方向与耦合光栅周期方向相垂直时 ( $90^\circ/270^\circ$ )，耦合效率达到最高，为 7.8%；当偏振方向与光栅周期方向平行时 ( $0^\circ/180^\circ$ )，此时无法激发表面等离激元，耦合效率几乎为零。经过数据拟合，耦合光栅的耦合效率与入射光偏振角度成余弦平方关系，这与周期性光栅中表面等离激

元的激发条件相吻合，表明该结构中耦合光栅能够有效激发表面等离激元。探测光栅处的吸收率最高能够达到 4.3%，它随偏振角度的变化趋势与耦合效率保持一致，证明了所提出的探测结构能够有效探测耦合光栅处激发的表面等离激元。

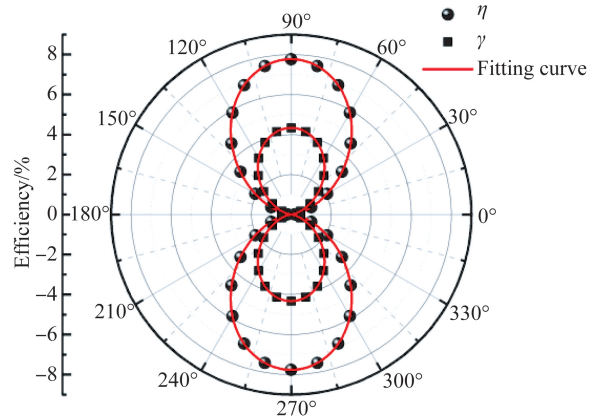


图 4 耦合效率、吸收率随入射光偏振角度的变化关系

Fig.4 Coupling efficiency and absorption efficiency as a function of polarization angle of incident light

#### 3.2 不同波导长度条件下的吸收率变化

为了进一步验证该探测结构的有效性，同时探究该结构中表面等离激元的传输损耗特性，本节内容根据 2.1 节可见光波段的探测模型，在仿真过程中固定耦合光栅和探测光栅的结构参数，通过改变条形波导长度研究探测光栅处的吸收率变化。如图 5 所示，在 670 nm 入射条件下，探测结构的吸收率随波导长度的增加呈指数衰减。而表面等离激元随传输距离的衰减可以表示为：

$$P_x = P_0 \cdot e^{-L_{\text{spp}} \frac{x}{L_{\text{spp}}}}, \quad (2)$$

其中： $x$  为表面等离激元的传输距离， $L_{\text{spp}}$  为表面

等离子激元的传播长度,  $P_0$  和  $P_x$  分别为传输距离为 0 和  $x$  时对应的表面等离子激元能量。

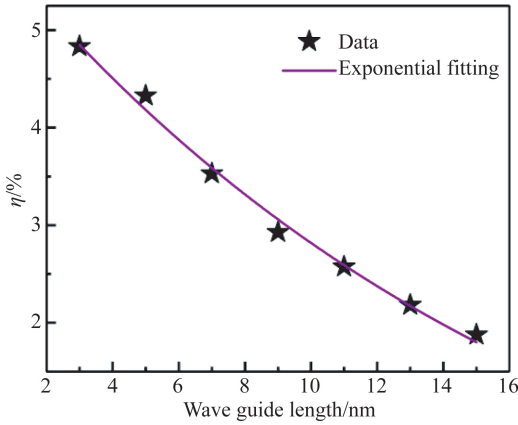


图 5 不同波导长度对应的吸收率

Fig. 5 Absorption efficiency corresponding to different waveguide lengths

由于吸收率  $\gamma$  的衰减对应金-空气界面表面等离子激元的传输损耗,因而将吸收率  $\gamma$  随传输距离的衰减根据方程(2)进行拟合,得到等离子激元的传播长度  $L_{spp}$  为  $17.1 \mu\text{m}$ 。

理论上,表面等离子激元的传播长度可以表示为<sup>[18]</sup>:

$$L_{spp} = \frac{1}{2k''_{spp}} = \lambda_0 \frac{(\epsilon_r)''^2}{2\pi\epsilon_i} \left[ \frac{\epsilon_d + \epsilon_r}{\epsilon_d \cdot \epsilon_r} \right]^{3/2}, \quad (3)$$

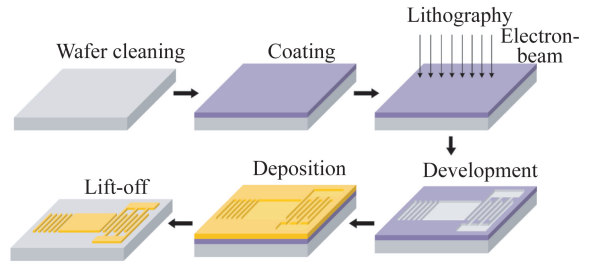
其中: $k''_{spp}$  为 SPP 波矢的虚部,  $\epsilon_r, \epsilon_i$  分别为金属相对介电常数的实部和虚部,  $\epsilon_d$  为介质的相对介电常数,  $\lambda_0$  为真空中的波长。将 670 nm 入射光条件下,金-空气界面的表面等离子激元的相关参数 ( $\epsilon_r = -14.085, \epsilon_i = 1.076, \epsilon_d = 1$ ) 代入式(3),得到传播长度的理论值为  $17.5 \mu\text{m}$ 。表面等离子激元传播长度的理论值与仿真计算得到的传播长度基本一致,证实了利用上述结构传输和探测表面等离子激元的有效性。

### 4 实 验

为验证上述仿真结果的正确性,本文围绕可见光波段的仿真模型,利用电子束曝光工艺制备了工作在 670 nm 的探测结构。具体结构参数如下:耦合光栅周期  $P=630 \text{ nm}$ ,宽度  $W=300 \text{ nm}$ ,厚度  $t=80 \text{ nm}$ ;波导结构为锥形金波导,长度  $L=5 \mu\text{m}$ ,厚度  $t=80 \text{ nm}$ ;探测光栅周期  $p=600 \text{ nm}$ ,宽度  $w=300 \text{ nm}$ ,厚度  $t=80 \text{ nm}$ 。

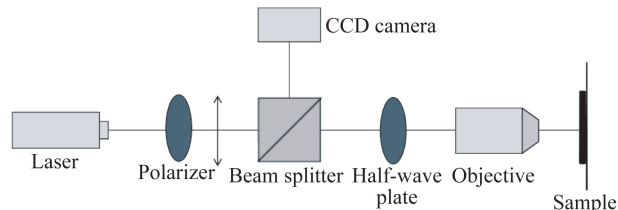
考虑到实际的人射光斑面积,在不影响耦合效率的前提下,实验制备过程中扩大了耦合光栅的面积,对应地增加了波导上半部分宽度。为了保持探测光栅面积尺寸不变,波导下半部分宽度维持不变,因此波导结构是图 7(a)插图所示的锥形结构,其余结构参数均与仿真结构相同。探测光栅制备成叉指电极结构,在表面等离子激元探测过程中有双重作用,一方面,探测光栅作为散射结构,能够将表面等离子激元重新解耦成自由空间的光,使它以光子的形式向硅基底散射;另一方面,探测光栅作为叉指电极能够有效收集硅基底吸收表面等离子激元之后产生的载流子,从而形成光电电流信号。

具体制备流程如图 6(a)所示,首先选用 N 型轻掺杂单抛硅片作为基底,经超声清洗后在硅片上旋涂光刻胶,随后利用电子束对样品进行图案化曝光;光刻完成后,将样品放入显影液中进行显影;然后,利用真空热蒸镀工艺在样品上蒸镀厚度为 80 nm 的金薄膜;最后,将样品放入丙酮溶液中剥离残余的光刻胶,制备得到所需的等离子激元探测结构。



(a)电子束曝光工艺

(a)Electron beam lithography process



(b)光电测试系统

(b)Photoelectric measuring system

图 6 实验制备流程及测试系统示意图

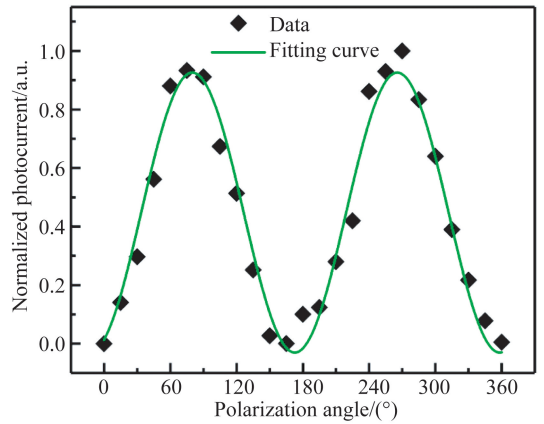
Fig. 6 Schematic diagram of preparation process and measuring system

样品制备完成后,利用如图 6(b)的微区光电测试系统对探测结构的光电性能进行测试。入射光源是波长为 670 nm 的激光光源,经过准直光

路后,由 50 倍的聚焦物镜聚焦到耦合光栅上。同时,利用 Keithley 2400 型多功能数字源表在叉指电极两端施加偏压,并测量叉指电极两端产生的光电流信号,从而探测耦合光栅处激发的表面等离子激元。测试过程中,在光路中添加偏振片和半波片来控制入射激光的偏振角度。

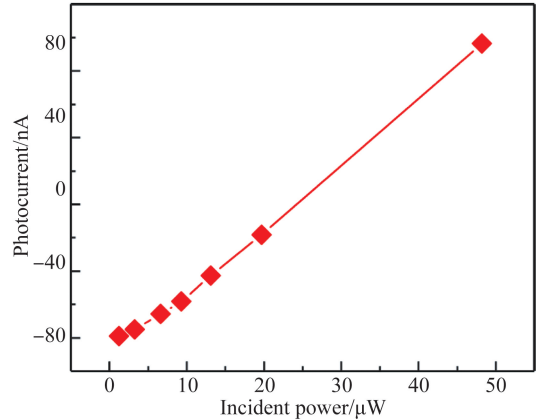
图 7(a)左上角的插图是制备的探测结构的 SEM 表征图,图 7(a)为暗态条件下探测光栅的伏安特性曲线,呈现出双肖特基结的线型,表明叉指电极能够起到有效的探测功能。由于探测光栅中叉指电极的间距较小,过高的偏压容易烧毁叉指电极,因此在实验测试过程中在叉指电极两端施加较低的偏压,为  $-1\text{ mV}$ 。图 7(b)所示为在  $6.63\text{ }\mu\text{W}$ ,  $670\text{ nm}$  的入射光照条件下测试得到的光电流随入射光偏振角度的变化关系。当入射光偏振方向与光栅周期方向相垂直时( $90^\circ/270^\circ$ ),光电流达到最高;当偏振方向与光栅周期方向平行时( $0^\circ/180^\circ$ ),光电流最小。通过拟合曲线可以发现,光电流与入射光偏振角度呈余弦平方关系,该趋势与图 4 中的吸收率变化趋势相吻合。因此,可见光波段探测结构的实验结果进一步证实了利用上述结构探测表面等离子激元的可行性。

为进一步表征所制备的探测结构的光电性能,实验测试了在  $-1\text{ mV}$  偏压,入射光偏振方向与光栅周期方向相垂直条件下( $90^\circ/270^\circ$ ),不同功率的  $670\text{ nm}$  入射光引起的光电流变化,结果如图 7(c)所示。入射光功率在  $1.23\sim 48.3\text{ }\mu\text{W}$ ,探测结构表现出良好的线性度。根据图 7(c)中光电流与入射光功率的线性关系,可以计算出该探测结构的响应度约为  $1.90\text{ mA/W}$ 。



(b)  $-1\text{ mV}$  偏压,  $6.63\text{ }\mu\text{W}$ ,  $670\text{ nm}$  的入射光照条件下,光电流随入射光偏振角度的变化

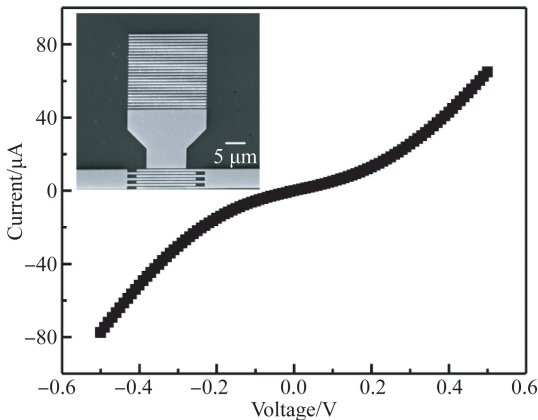
(b) Photocurrent as a function of polarization angle of incident light under  $670\text{ nm}$  illumination ( $-1\text{ mV}$  bias voltage,  $6.63\text{ }\mu\text{W}$ )



(c)  $-1\text{ mV}$  偏压下不同入射光功率条件下的光电流  
(c) Photocurrent under different incident powers with bias voltage of  $-1\text{ mV}$

图 7 探测结构光电特性测试结果

Fig. 7 Photoelectric properties of detection structure



(a) 暗态电流-电压特性曲线,插图:探测结构 SEM 形貌图  
(a) Dark  $I$ - $V$  characteristics curve. Inset: SEM image of detection structure

上述实验结果表明,所提出的探测结构能够有效控制由耦合光栅激发的表面等离子激元。然而,仿真计算得到的探测效率和实验测得的响应度均较低,与传统的光电探测器存在一定差距,其原因可以分为以下三点:一是表面等离子激元的耦合效率偏低;二是表面等离子激元在金属-空气界面固有的高传输损耗,致使最终的探测效率较低;三是在波导上传输的表面等离子激元被探测光栅解耦后,有一部分以光子的形式散射到自由空间中,无法被硅基底吸收形成光电流,造成了一定的损耗。因此,在后续研究中,可以通过改进耦合光栅结构或设计单向耦合结构来提高表面等离子激元的耦合效率;设计制备低损耗的长程表面等离子激元波导,

以降低传输过程中的损耗;优化探测光栅结构参数或在探测光栅底部添加金属反射层,以提高表面等离子激元的吸收率。从耦合效率、传输损耗和吸收效率三方面提升表面等离子激元探测器的探测效率。

## 5 结 论

本文提出了一种基于周期性光栅的平面型表面等离子激元探测结构。首先,利用二维时域有限差分方法设计了工作在可见光波段(670 nm)和光通信波段(1 310 nm 和 1 550 nm)的仿真模型,并通过改变入射光的偏振角度,得到耦合光栅的耦合效率与偏振角度成余弦平方关系,验证了周期性

光栅中的等离子激元激发特性。随后,研究了吸收率随条形波导长度的变化关系,结果表明该结构在670 nm波段的表面等离子激元传播长度为 $17.1 \mu\text{m}$ ,与金-空气界面的表面等离子激元传播长度的理论值( $17.5 \mu\text{m}$ )基本吻合。通过实验制备可见光波段的探测结构,测得光电流与偏振角度成余弦平方关系,与仿真结果相对应,进一步验证了所提出的结构能够实现表面等离子激元的有效探测。最后总结分析了探测结构在探测效率方面的不足,并探讨了提高探测效率的改进方案。本文提出的平面型表面等离子激元探测结构相对简单,制备工艺与传统 CMOS 工艺兼容,有望成为未来高速、集成化的表面等离子激元电路的组成部分,并为此提供理论和实验基础。

## 参考文献:

- [1] KIRCHAIN R, KIMERLING L. A roadmap for nanophotonics [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 303-305.
- [2] HUANG B J, ZHANG X, WANG W, *et al.*. CMOS monolithic optoelectronic integrated circuit for on-chip optical interconnection [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(16/17): 3924-3927.
- [3] ZIA R, SCHULLER J A, CHANDRAN A, *et al.*. Plasmonics; the next chip-scale technology [J]. *Materials Today*, 2006, 9(7/8): 20-27.
- [4] 陈广甸, 翟雨生, 李裕培, 等. 基于等离子激元热电子效应的光电晶体管制备及其特性 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3): 517-522.  
CHEN G D, ZHAI Y SH, LI Y P, *et al.*. Fabrication and properties of plasmonic hot-electron phototransistor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 517-522. (in Chinese)
- [5] 余晓畅, 赵建村, 虞益挺. 像素级光学滤波-探测集成器件的研究进展 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 999-1012.  
YU X C, ZHAO J C, YU Y T. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 999-1012. (in Chinese)
- [6] DU W, WANG T, CHU H S, *et al.*. Highly efficient on-chip direct electronic-plasmonic transducers [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 623-627.
- [7] LIU Y, ZHANG J S, LIU H P, *et al.*. Electrically driven monolithic subwavelength plasmonic interconnect circuits [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1701456.
- [8] LIU Y, ZHANG J S, PENG L M. Three-dimensional integration of plasmonics and nanoelectronics [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(12): 644-651.
- [9] THOMASCHESKI M, YANG Y Q, WOLFF C, *et al.*. On-chip detection of optical spin-orbit interactions in plasmonic nanocircuits [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1166-1171.
- [10] SOLIS D, PAUL A, OLSON J, *et al.*. Turning the corner: efficient energy transfer in bent plasmonic nanoparticle chain waveguides [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(10): 4779-4784.
- [11] DREZET A, HOHENAUF A, KOLLER D, *et al.*. Leakage radiation microscopy of surface plasmon polaritons [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2008, 149(3): 220-229.
- [12] DASGUPTA A, MENNEMANTEUIL M, BURET M, *et al.*. Optical wireless link between a nanoscale antenna and a transducing rectenna [J]. *Nat Communications*, 2018, 9(1): 1992.
- [13] NEUTENS P, VAN DORPE P, DE VLAMINCK I, *et al.*. Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(5): 283-286.
- [14] GOODFELLOW K M, CHAKRABORTY C, BEAMS R, *et al.*. Direct on-chip optical plasmon detection with an atomically thin semiconductor [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5477-5481.
- [15] EE H S, NO Y S, KIM J, *et al.*. Long-range sur-

face plasmon polariton detection with a graphene photodetector [J]. *Opt Letters*, 2018, 43(12): 2889-2892.

- [16] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.

[17] PALIK E. *Handbook of Optical Constants of Solids II* [M]. Academic Press Handbook Series, New York: Academic Press, 1985.

- [18] RAETHER H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988.

#### 作者简介:



计吉焘(1994—),男,江苏苏州人,硕士研究生,2017年于南京师范大学获得学士学位,主要从事表面等离激元光电器件及光电集成芯片方面的研究。  
*E-mail*: Rex2017@seu.edu.cn

#### 通讯作者:



王琦龙(1976—),男,安徽蚌埠人,教授,博士生导师,1999年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2002年、2005年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳电子器件、光电系统设计与工程、真空光电器件的研究。  
*E-mail*: northrockwql@seu.edu.cn