

## 基于表面等离子激元谐振腔的窄谱增强传感器

王琳<sup>1,2,3</sup>, 张磊<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>上海同步辐射光源, 上海 201204

**摘要** 表面等离子激元是一种局域在金属和介质之间的电磁波, 与金属表面自由电子的集体振荡有关, 具有高度局域和近场增强的特性。为此, 利用表面等离子激元谐振腔对红外窄谱增强成像设备进行设计, 单个纳米等离子激元谐振腔由两片金属银层构成。模拟结果表明, 该纳米等离子激元谐振腔在红外波段起到窄谱吸收的作用, 在纳米等离子激元谐振腔中, 吸收波段得到较大的电场增强, 并且可以同时屏蔽不需要的波段。这种窄谱的 CCD (Charge Coupled Device) 有望应用在高分辨成像和日用红外 CCD 等领域, 并且该设计展示出利用硅半导体 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 平台制作波长约为 800 nm 的近红外 CCD 的商业应用价值。

**关键词** 表面光学; 表面等离子激元; 微纳光学; 近红外; 时域有限差分

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0724001

## Narrow-Spectrum Enhanced Sensor Based on Surface Plasmon Resonator

Wang Lin<sup>1,2,3</sup>, Zhang Lei<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup> Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup> Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai 201204, China

**Abstract** As a kind of electromagnetic wave localized between metal and medium, surface plasmons is related to the collective oscillation of free electrons on the metal surface and has the characteristics of high-level localization and near-field enhancement. Therefore, an infrared narrow-spectrum enhanced imaging device is designed by using surface plasmon resonator. A single nanometer plasmon resonator is composed of two silver layers. The simulation results show that the resonator plays a narrow-spectrum absorption role in the infrared band. In the nanometer plasmon resonator, the absorption band is greatly enhanced by an electric field, and the undesired bands can be shielded at the same time. Such a narrow-spectrum CCD (Charge Coupled Device) is expected to be used in high-resolution imaging and daily infrared CCD, and the design demonstrates the commercial value of using a silicon-semiconductor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) platform to fabricate near-infrared CCD with wavelengths around 800 nm.

**Key words** optics at surfaces; surface plasmons; micro-nano optics; near infrared; finite-difference time-domain

**OCIS codes** 240.6680; 310.6805; 120.4570

## 1 引言

CCD (Charge Coupled Device) 是一种由二维的

光敏传感器阵列组成的成像元件<sup>[1-2]</sup>。自 1970 年以来, CCD 广泛应用于生物医学成像和手机摄像头等领域。每一个 CCD 中的像素点对应一个光敏传感

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-26; 录用日期: 2020-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(11675249)

\* E-mail: zhanglei@sinp.ac.cn

器,其由施加电压的金属电极和光敏半导体组成。无光照的情况下,光敏传感器中光敏半导体的电阻很大,两端金属电极之间的电流很小。当有光照射到中间的光敏半导体时,其电阻降低,电流增大,说明 CCD 接收的光信号转换为电信号。

当 CCD 成像时,对于不同的光波段须选择不同的光敏半导体材料。对于可见光波段,普遍采用的光敏半导体材料为 Si;对于红外波段,普遍采用的光敏半导体材料为  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  和 Ge 等<sup>[3-4]</sup>。现有的 CCD 大多属于宽谱成像设备,然而对于高分辨成像、车载红外雷达成像和日间红外成像,则需要专门的窄谱成像设备。在自动驾驶领域,当车辆在高速行驶时,需要精确的定位雷达系统来确定汽车周围的环境,从而确保汽车的安全行驶,业界人士认为最优的选择是近红外波段的车载红外雷达系统。然而,在近红外波段还面临一些亟待解决的问题。一是  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  和 Ge 半导体材料通常依赖于昂贵的生长设备,需要使用主动冷却装置以降低热噪声,而且与标准的 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)工艺不兼容。二是  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  和 Ge 半导体材料对近红外波段与可见光波段同时有吸收能力,在日间若直接使用  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  和 Ge 材料进行近红外成像,信号会受到可见光信号的干扰,原因在于 CCD 的成像质量取决于衬度。信号光越强,则激起的电流信号越强,衬度(信号相比于噪声光)就越高,成像质量也越好。在日间使用的情况下,可见光的干扰较为严重,故需要窄谱成像设备来屏蔽其他波段的光(噪声光)对 CCD 成像的干扰。

表面等离子激元(SPPs)是一种在金属和介质之间表面传播的电磁波,与金属表面自由电子的集体振荡有关<sup>[4]</sup>,具有高度的局域性和近场增强的特性,迄今为止已在生物传感、亚衍射极限成像、聚焦和光刻以及纳米光学电路中得到了广泛的应用<sup>[5-9]</sup>。鉴于此,本文利用 SPPs 谐振腔对红外窄谱增强成像设备进行设计。设计的 SPPs 谐振腔是一种 MIM(Metal-Insulator-Metal)波导,其由两块相互平行的金属片构成,金属片所用的材料为 Ag。MIM 波导中,当缩短两层金属片的长度时,垂直入射的光激发的 SPPs 并不会散射到远场,而是在双层金属片中产生谐振。使用 FDTD(Finite Difference Time Domain)软件对 MIM 波导进行验证,发现所设计的结构对窄谱有着较高的吸收率,同时对其他波段具有良好的屏蔽效应。其次,对 SPPs 谐振腔进行周期性的连结,从而拼接 CCD 中的像素点。最后,将

半导体线放入谐振腔中(对不同的波段可以选择不同的半导体材料),微调结构参数即可构成理想的 MIM-CCD 像素单元。Si 半导体的制备工艺成熟,价格低廉,但是 Si 对可见光的吸收率远大于红外光,所以基于 Si 半导体 CMOS 的 CCD,如手机摄像头无法进行红外光成像,这说明了使用 Si 材料制作近红外 CCD 具有巨大的应用潜力。

## 2 设计和仿真

### 2.1 MIM-SPPs 谐振腔

MIM-SPPs 谐振腔指的是一种适应 CCD 成像并经过参数优化的 MIM 谐振腔。MIM 波导<sup>[10-11]</sup>是一种 SPPs 波导,而 SPPs 在 MIM 波导中以低损耗的形式进行传输<sup>[12-13]</sup>,该波导已用于设计光开关和马赫-曾德尔干涉仪<sup>[14-15]</sup>。实验中,MIM-SPPs 谐振腔的基本结构和 SPPs 的传输方向如图 1(a)所示。该 MIM 波导的物质基础为 Ag-air-Ag,入射光的方向与金属薄膜的表面垂直。MIM-SPPs 谐振腔中基模的传播常数  $\beta$  可通过 MIM 波导的色散方程计算<sup>[15]</sup>,表达式为

$$\tan(\gamma_d d) = \frac{2T}{1 - T^2}, \quad (1)$$

其中

$$T = \epsilon_d \gamma_m / \epsilon_m \gamma_d, \quad (2)$$

式中: $d$  为 MIM 波导内介质层的厚度; $\epsilon_d$  为位于两个金属片之间介质材料的介电常数,该介质为空气,故  $\epsilon_d = 1$ ;  $\epsilon_m$  为金属片的介电常数,该金属为 Ag;  $\gamma_d = (k_\omega^2 \epsilon_d - \beta^2)^{1/2}$ ;  $\gamma_m = (\beta^2 - k_\omega^2 \epsilon_m)^{1/2}$ ,  $k_\omega$  为入射光在真空中的传播常数,  $k_\omega = \omega/c$ ,  $\omega$  为模式角频率,  $c$  为光在真空中的速度。由(1)式和(2)式可得,已知入射光频率、金属及介质材料,对于不同的介质厚度,都可求得  $\beta$ 。另外,  $\beta/k_\omega$  是在波导中传播 SPPs 的模式折射率  $n_{\text{eff}}$ 。

缩短 MIM 波导的长度,SPPs 模式将从图 1(a)的行波传输转变为局限在金属片之间的驻波共振,如图 1(b)所示,其中每个 Ag-air-Ag 小单元相当于一个纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔。与 MIM-SPPs 波导相同,固定尺寸的谐振腔内的 SPPs 可以被特定的波长激发,被吸收的光在纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中转换成谐振模式。对于其他波段的光,大部分的光在纳米尺度的谐振腔的表面发生反射,小部分的光在表面反射后被吸收,其余部分的光按照原来的传播方向发生透射。对 Ag-air-Ag 小单元进行周期性的阵列式排布,可以组成一个

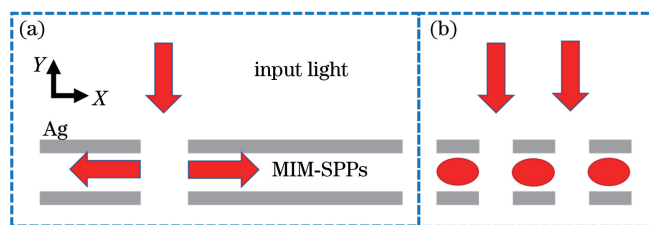


图 1 光沿 Y 轴的负方向入射至不同结构的示意图。(a) MIM 波导;(b) MIM-SPPs 谐振腔

Fig. 1 Diagram of light incident in negative direction of Y axis into different structures. (a) MIM waveguide;  
(b) MIM-SPPs resonator

CCD 成像面,其中每一个纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔相当于 CCD 中的一个像素点。不同的入射光强会影响纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔内的 SPPs 场强,从而纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中的信号强度可一一对应于 CCD 传感器所接收的光强度。

## 2.2 FDTD 设计模拟

本节展示单个纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔的

设计。单个纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中,靠近波长为 960 nm 的入射光一端的金属 Ag 的厚度  $b$  为  $0.1 \mu\text{m}$ ,远离入射光一端的金属 Ag 的厚度  $c$  为  $1.0 \mu\text{m}$ ,金属之间的空气层厚度  $d$  为  $467 \text{ nm}$ ,纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔的左右宽度  $a$  为  $1.1 \mu\text{m}$ ,结构如图 2(a)所示。波长为 960 nm 的横电(TE)偏振光平行纸面从上往下,也就是沿着 Y 轴的负方向入射。

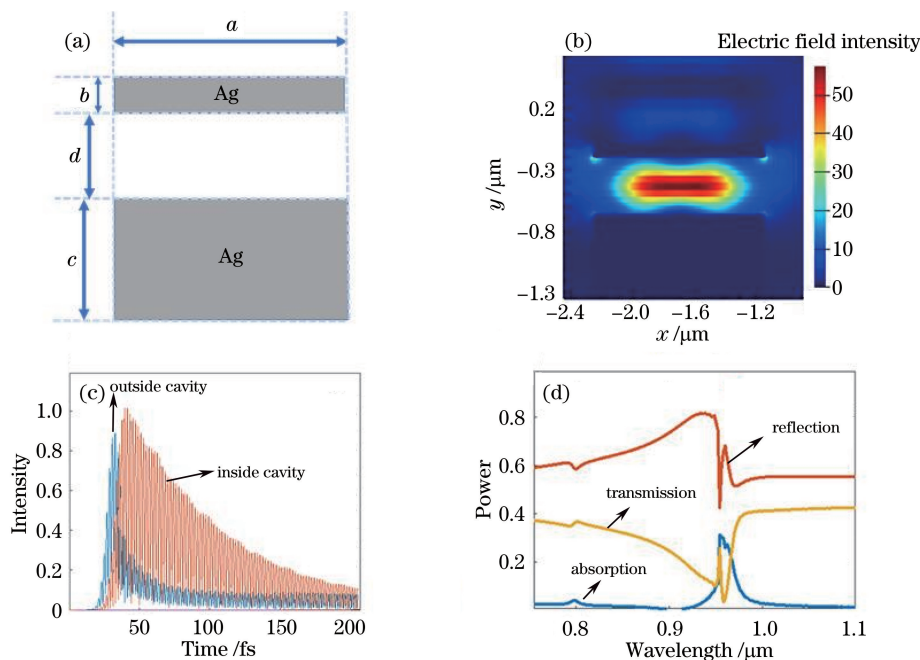


图 2 SPPs 谐振腔。(a)结构示意图;(b) TE 偏振光入射的场分布;(c)腔内中心点和腔外任意点的场强对比曲线;(d)腔内的性能曲线

Fig. 2 SPPs resonator. (a) Structural sketches; (b) field distribution of incident TE polarized light; (c) field intensity contrast curves of center point inside cavity and any point outside cavity; (d) performance curves in cavity

使用 FDTD 软件对设计的结构进行模拟,光入射后的场分布如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看到,垂直入射的 TE 偏振光在纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中转化为 SPPs,并且强度大于自由空间中的光。图 2(c)为纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔内部和外部的电场强度随时间的变化曲线。从图 2(c)可以看到,谐振腔内部的 SPPs 场强度在 200 fs 以

内能够维持较大的值,这与图 2(b)所描述的 SPPs 局域在共振腔中的现象一致。共振腔外部的光场由于缺乏谐振腔的储存能力,在不到 100 fs 的时间内迅速衰减。设计的结构具体对光波段的吸收、反射和透射的性能如图 2(d)显示。从图 2(d)可以看到,对于波长在  $0.75 \mu\text{m}$  到  $1.00 \mu\text{m}$  之间的红外波段,在  $0.95 \mu\text{m}$  的波长处出现吸收率为 0.30 的吸收

峰,说明对应的入射波段可以激发 SPPs,窄谱增强约为 100 nm。由上述模拟结果可以得到,纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔可用于制备窄谱增强的探测器,并具有较高的吸收效率。

### 3 CCD 成像模拟

#### 3.1 点光源入射

由第 2 节可知,单个纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔可对红外光进行波长的选择增强,并具有较高的吸收效率。若对谐振腔进行周期性的排布,便可成为一个 CCD 的传感器矩阵面。构成 CCD 之前,首先应保证各个传感器单元(像素)之间不会有信号串扰。本节模拟点光源入射的成像,通过观察光经过透镜聚焦后在传感器表面(镜头的后焦面)的情况,从而验证各个传感器单元之间不会有信号串扰。光聚焦在传感器表面的情况如图 3(a)所示,其中 5 对板块对应 5 个纳米共振腔,圆圈和箭头代表一个焦平面上的入射点光源和入射方向。图 3(b)为 FDTD 的模拟结果。从图 3(b)可以看到,单个信号点光源只会在相邻的腔体中出现电场增强的现象,并不会串扰到其他单元。纳米尺度的谐振腔阵列的排布周期为  $1.9 \mu\text{m}$ ,原因在于单个信号点光源在相邻的腔体中出现电场增强的现象,故分辨率可以保证在  $3.8 \mu\text{m}$  及以上。若对电场强度进行相应的数字解码,则可以计算出原焦平面上的场分布,理论上分辨率可以达到  $1.9 \mu\text{m}$ 。

#### 3.2 光电信号转换

被吸收的光在多次振荡之后会被金属吸收并以热量的形式散发,为此不能转化为电信号。在谐振腔内部放置光敏半导体材料,则谐振腔内部的光可以被光敏半导体吸收,从而转化为“电子-空穴”对,在外加电场的作用下形成电流,使光信号转化为电信号,形成与 CCD 类似的结构。谐振腔中的 Ag 片相当于正负电极,中间的半导体材料 Si 为光敏电阻,结构如图 4 所示。

SPPs 的近场增强效应可以提高光生载流子的效率<sup>[16]</sup>,同时谐振腔内的光是多次反射的,这相当于增加半导体材料的吸收长度。Si 材料的制备工艺成熟,对可见光波段的吸收能力强,但对近红外光的吸收能力很弱。鉴于此,实验以对 Si 材料进行近红外成像为例,展示该谐振腔对窄谱吸收的特点。经过多次优化设计,Si 纳米线的直径为 100 nm。

放置 Si 纳米线后,纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中的场分布如图 5(a)所示。从图 5(a)可以看到,

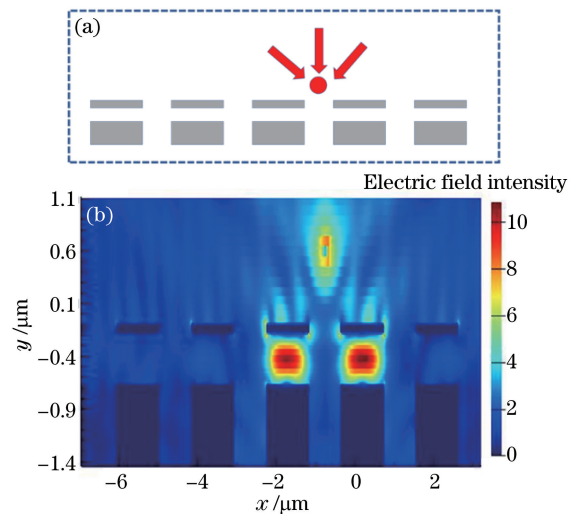


图 3 点光源入射周期性排布的 SPPs 谐振腔。(a) 光聚焦在传感器表面的示意图;(b) FDTD 的仿真结果  
Fig. 3 SPPs resonator with periodic arrangement of point light source incident. (a) Schematic of light focusing on sensor surface; (b) simulation results of FDTD

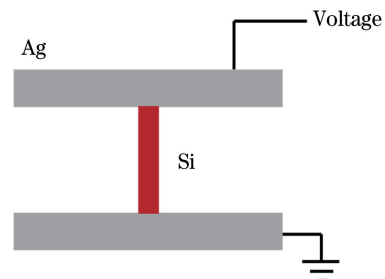


图 4 CCD 的单元示意图  
Fig. 4 Schematic of CCD unit

Si 纳米线与 Ag 片垂直并位于两个 Ag 片之间,电场在 Si 纳米线的两侧形成谐振且电场较强,而 Si 纳米线的内部外侧有较强的电场。纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔的宏观性质如图 5(b)所示。从图 5(b)可以看到,加入 Si 纳米线的纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔在  $0.96 \mu\text{m}$  处存在吸收峰,且透射、反射和吸收谱与图 2(d)相似,证明添加 Si 纳米线后对纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔的宏观性质没有明显改变。

对于实现 CCD 传感,Si 纳米线将光信号转换为电信号的前提是 Si 对光信号有较强的吸收能力。Si 在近红外波段的折射率虚部数据点如图 5(c)所示。从图 5(c)可以看到,Si 折射率的虚部值与吸收率直接相关,虚部值越大,则吸收率也越大;吸收率从  $0.85 \mu\text{m}$  开始,到  $1.05 \mu\text{m}$  逐渐下降,超过

1.05  $\mu\text{m}$  几乎不吸收。通过 FDTD 光生载流子求解器仿真光照下的电子-空穴对产生率,载流子浓度的变化曲线如图 5(d)所示。原理:假设材料吸收的光全部转化为“电子-空穴对”且不会自发中和,求解泊松方程和漂移扩散方程即可得到载流子浓度。作为比较,仿真 Si 纳米线在去除共振腔前后电子-空穴对的产生率。从图 5(d)可以看到,去除共振腔的变化趋势与图 5(c)几乎一致;纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔中的 Si 纳米线在宽谱的照射下,电子-

空穴对的产生率变化曲线与 Si 折射率的虚部数据点不同,谐振腔内 Si 纳米线的电子-空穴对产生率在 0.80~0.95  $\mu\text{m}$  波段范围内几乎完全被屏蔽,而在 0.96  $\mu\text{m}$  波段附近,电子-空穴对的产生率出现大幅度提高并出现峰值。原因在于光在谐振腔内部发生谐振并进行多次反射,这会增加 Si 的吸收长度。若在 Ag 片的两端施加电压,可以使光信号转化为电信号,则整个谐振腔传感器的单元类似一个理想的 CCD 成像单元。

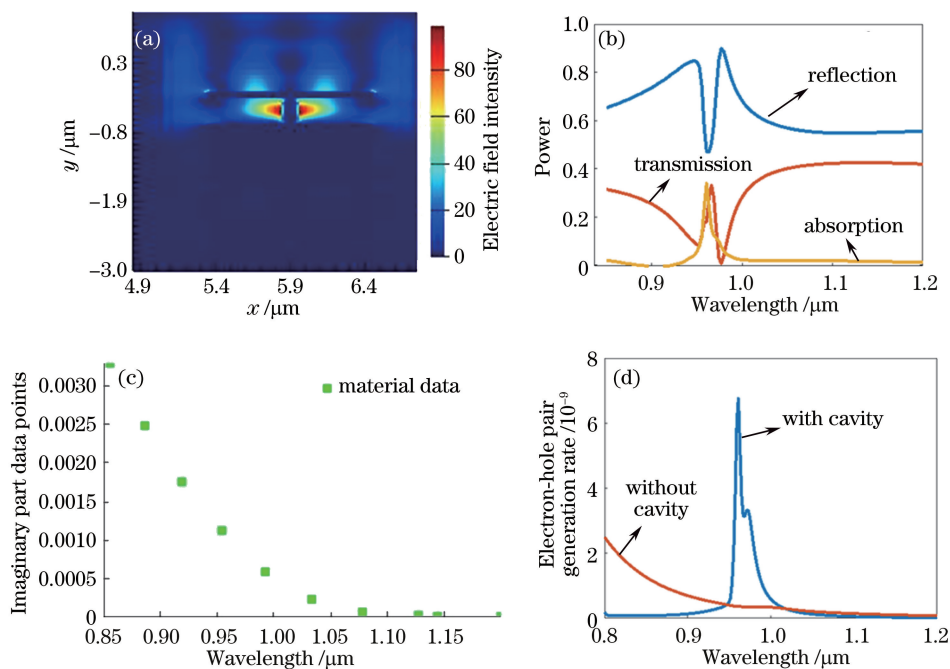


图 5 SPPs 谐振腔加 Si 纳米线后的性能示意图。(a)场分布示意图;(b)宽谱的透射、反射和吸收谱曲线;(c) Si 折射率的虚部数据点;(d)载流子浓度变化曲线

Fig. 5 Performance diagram of SPPs resonator with Si nanowires. (a) Field distribution diagram; (b) transmission, reflection and absorption spectra of broad spectrum; (c) imaginary part data points of Si refractive index; (d) carrier concentration curves

## 4 结 论

利用 SPPs 谐振腔对红外窄谱增强成像设备进行设计,该 SPPs 谐振腔是一种纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔,由两片 Ag 层构成。在 FDTD 软件中的模拟结果显示,纳米尺度的 MIM-SPPs 谐振腔的设计表现出独特的窄谱增强吸收特性,在 0.95  $\mu\text{m}$  的波长处出现吸收率为 0.30 的吸收峰,而且在腔内添加 Si 纳米线,可以将光信号转化为电信号。该设计可以展示出利用现有 Si 半导体 CMOS 可制备出波长约为 800 nm 的近红外 CCD 的商业应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Yao P P, Sun L, Xu S L, et al. Design of a scientific-grade CCD refrigeration system and analysis

of its thermal characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1704001.

姚萍萍, 孙亮, 许孙龙, 等. 科学级 CCD 制冷系统设计及其温度特性分析[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1704001.

[2] Wu P, Jiang Y S, Xu Z Q, et al. Experimental research on CCD imaging equipment in intensive electromagnetic-pulse environment[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0611002.

吴平, 姜云升, 徐志谦, 等. CCD 成像设备在强电磁脉冲环境下的效应实验研究[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0611002.

[3] Li C, Yang Q Q, Wang H J, et al.  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  resonant-cavity-enhanced photodetectors with a silicon-on-oxide reflector operating near 1.3  $\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(2): 157-159.

- [4] Dosunmu O I, Cannon D D, Emsley M K, et al. Resonant cavity enhanced Ge photodetectors for 1550 nm operation on reflecting Si substrates [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(4): 694-701.
- [5] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [6] Maradudin A A, Sambles R J, Barnes W L. *Modern plasmonics*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [7] Kawata S, Inouye Y, Verma P. Plasmonics for near-field nano-imaging and superlensing [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(7): 388-394.
- [8] Wei R X, Wang Y W, Jiang L W, et al. Detection of chemical vapor deposition-prepared graphene by surface plasmon polariton imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1124002.  
魏茹雪, 王延伟, 江丽雯, 等. 利用表面等离子激元成像检测化学气相沉积法生长石墨烯 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1124002.
- [9] Wu M, Liang X Y, Sun D X, et al. Design of asymmetric rectangular ring resonance cavity electrically adjustable filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1423001.  
吴梦, 梁西银, 孙对兄, 等. 基于表面等离子激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1423001.
- [10] Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1124001.  
杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1124001.
- [11] Hohenau A, Krenn J R, Stepanov A L, et al. Dielectric optical elements for surface plasmons [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 893-895.
- [12] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 508-511.
- [13] Ditlbacher H, Krenn J R, Schider G, et al. Two-dimensional optics with surface plasmon polaritons [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(10): 1762-1764.
- [14] Shen Y, Yu G P, Fu J W, et al. Gain-assisted optical switching in plasmonic nanocavities [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 021301.
- [15] Zeng X, Gao Y K, Hu H F, et al. A metal-insulator-metal plasmonic Mach-Zehnder interferometer array for multiplexed sensing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(13): 133102.
- [16] Atwater H A, Polman A. Erratum: plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(10): 865.