

等离激元光电探测器的光吸收特性研究

柯熙政, 周茹*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 基于有限元法建立三维(3D)数学模型, 计算硅薄膜光电探测器表面周期性分布的 Ag 纳米颗粒阵列对光电探测器光吸收性能的影响。结果表明对于球状 Ag 纳米颗粒阵列, 阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值是影响硅薄膜光吸收效率的关键因素。当硅衬底顶部粒子排布较密(P 与 d 的比值较小)时, 与裸硅光电探测器相比, 等离激元光电探测器在不同入射角度下的光吸收效率都有不同程度的提高, 其中在波长为 700 nm、入射角度范围为 $0^\circ \sim 65^\circ$ 时, 光吸收效率从 5% 提升到 65%, 整个波段范围内光电转换效率从 29% 增强为 34%。

关键词 表面光学; 表面等离激元; 纳米颗粒阵列; 光吸收

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202415

Light Absorption Characteristics of Plasmonic Photodetectors

Ke Xizheng, Zhou Ru*

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract We establish a three-dimensional (3D) mathematical model based on the finite element method and calculate the effect of the Ag nanoparticle arrays that are periodically distributed on the surface of the silicon thin-film photodetector on its light absorption performance. The results denote that, for the spherical Ag particle arrays, the key parameter affecting the light absorption efficiency of the silicon film is the ratio of the period to particle diameter. When the top particles of the silicon substrate are densely packed (i. e., when the ratio P/d is small), the absorption efficiency of the plasmon photodetector is improved to different extents at different incident angles when compared with that of the bare silicon photodetector. The absorption efficiency increases from 5% to 65% at the wavelength of 700 nm with the incident angle ranging from 0° to 65° . Furthermore, the photoelectric conversion efficiency increases from 29% to 34% over the entire wavelength range.

Key words optics at surfaces; surface plasmon; nanoparticle arrays; light absorption

OCIS codes 240.6680; 240.0310; 240.6700; 300.1030

1 引言

光电探测器的工作机理是通过吸收光子激发半导体内的电子-空穴对, 进而形成光电流。光吸收越多, 形成的光电流也越多。目前表面等离子体共振技术是提高半导体光吸收的最佳解决方案之一^[1]。表面等离激元是指电磁波入射到金属表面时与金属表面自由振动的电子相互作用产生的电磁波^[2]。基于表面等离激元的光电子器件可以突破衍射极限, 在纳米尺度范围内对光进行操纵, 实现了传统的光电子器件所不具有的新功能^[2]。因此, 研究表面等

离激元对增强半导体的光吸收具有很重要的意义。

文献[3-4]中报道了利用表面等离激元增强半导体光吸收的研究。2005年, Schaad等^[5]研究了在半导体表面制备不同半径的球形 Au 纳米颗粒, 结果表明粒子尺寸的改变对半导体的光吸收效率有一定的影响。2009年, Beck等^[6]分别在 SiO_2 、 Si_3N_4 和 TiO_2 3种不同材料的反射层上制备一层 Ag 纳米颗粒, 产生表面等离子体共振峰的峰值相差达到 200 nm。2014年, Yin等^[7]通过设计双界面太阳能电池结构, 发现此结构在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的入射角范围内都能保持很高的光吸收效率。2015年, 丁东等^[8]通过在硅薄膜电

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-03-13; 录用日期: 2019-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

* E-mail: 18710620632@163.com

池表面制备球状 Al 纳米颗粒阵列,发现当纳米颗粒阵列周期与半径的比值为4~5时硅衬底的光吸收效率仅达20%。2016年,Liu等^[9]通过在硅薄膜太阳能电池的ITO层上制备一层Au纳米颗粒,发现与裸硅薄膜太阳能电池相比其透过率有明显的提高。2018年,赖淑妹等^[10]对圆柱形Ag纳米结构进行模拟分析,发现Ag纳米结构的尺寸、间距对局域表面等离子体共振峰(LSPR)有显著的影响。综上,在入射光垂直入射的情况下,讨论粒子的材料、大小、形状和粒子之间的距离等几种因素对于半导体光吸收的影响已有大量的研究,但目前为止,系统地考虑入射光照方向对半导体光吸收影响的研究还鲜有报道。

本文通过建立数学模型,研究在硅薄膜光电探测器表面制备的球状Ag纳米颗粒阵列,计算光的不同入射角度及不同波段对光电探测器光吸收效率的影响,进而获得不过分依赖入射光角度的优良的光电探测器结构。

2 数学模型

利用有限元法(FEM)仿真分析光电探测器的光吸收特性。图1(a)为设计的硅薄膜光电探测器三维结构示意图,由上到下依次为周期性分布的Ag纳米颗粒、抗反射膜SiO₂、Si吸收层(包括p,i,n三层)。在这里硅光电探测器的光谱响应范围为400~

1100 nm。图1中, h 表示抗反射膜SiO₂的厚度, t 表示硅衬底的厚度, P 表示Ag纳米颗粒阵列中相邻两颗球心之间的距离,称为阵列周期。Ag纳米颗粒形状为常见的球状,其直径 d 的取值范围为50~200 nm,阵列周期 P 的取值范围为100~300 nm。取图1(a)中的一个周期性单元来建立三维数学模型,该模型在 $x-z$ 平面内的截面图如图1(b)所示。模型的四周(即 x 轴方向和 y 轴方向)采用周期性边界条件(PBC)表示在横轴方向硅光电探测器为无限结构,上下(即 z 轴方向)采用完美匹配层(PML)边界条件,以使仿真更接近真实情况。采用AM1.5太阳光谱于光电探测器的上表面垂直入射(即沿 z 轴负方向且此时的入射角度为0°),入射光波长范围为400~1100 nm,入射光电场分量平行于 x 轴即TM波。Ag的光学常数取自参考文献^[11],SiO₂的折射率取1.5。

通过求解麦克斯韦基本方程组,可得到光电探测器结构中每个区域的电磁场分布,进而求得每个区域的光吸收。所求解的麦克斯韦方程组分为两式^[12],即

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \left[\left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right)^{-1} \nabla \times \mathbf{H} \right] - k_0^2 \mu_r \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

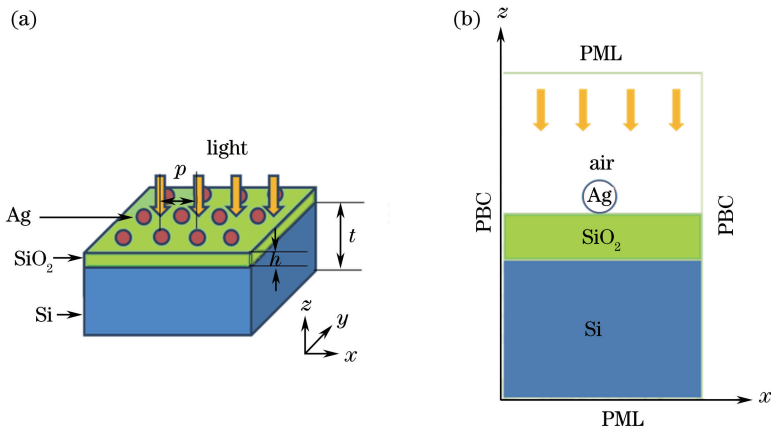


图1 数学模型结构图。(a)硅薄膜光电探测器的结构示意图;(b)数学模型的截面图

Fig. 1 Structural diagrams of mathematical model. (a) Schematic of silicon thin film photodetector; (b) cross-sectional view of mathematical model

式中:波数 k_0 为 ω_0/c ; ω_0 为入射光的初始角频率; c 为光速; ϵ_r 和 μ_r 分别为介质的相对介电常数和相对磁导率; ω 为入射光的角频率; ϵ_0 为真空介电常数; σ 为电导率。

入射光采用的平面波为TM波,它的磁场分量沿 z 方向,电场分量沿 x 方向和 y 方向。磁场和电

场的表达式^[12]分别为

$$\mathbf{H}(x, y, t) = H_z(x, y, t) \mathbf{e}_z = H_z(x, y) \mathbf{e}_z \exp(j\omega t), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, t) &= E_x(x, y, t) \mathbf{e}_x + E_y(x, y, t) \mathbf{e}_y = \\ &= E_x(x, y) \mathbf{e}_x \exp(j\omega t) + E_y(x, y) \mathbf{e}_y \exp(j\omega t) = \\ &= [E_x(x, y) \mathbf{e}_x + E_y(x, y) \mathbf{e}_y] \exp(j\omega t), \quad (4) \end{aligned}$$

式中: H_z 、 E_x 、 E_y 分别表示 z 轴上的磁场强度, x 、 y 轴上的电场强度; e_z 、 e_x 、 e_y 分别表示 z 、 x 、 y 轴的单位矢量; t 为时间。

如图1(b)所示,硅衬底的光吸收效率定义为

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda), \quad (5)$$

式中: $R(\lambda)$ 、 $T(\lambda)$ 分别表示入射到硅衬底的表面反射率和透射率。由于模型中的两个端口(入射端口和出射端口)支持 S 参数计算,通过对模型中端口 S 参数的计算可得到透射率和反射率。 S 参数^[13]定义为

$$S_{21} = \frac{1}{\cos(nkl) - \frac{j}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \sin(nkl)}, \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{j}{2} \left(\frac{1}{z} - z \right) \sin(nkl), \quad (7)$$

式中: S_{21} 、 S_{11} 分别为透射系数和反射系数; j 为虚数, k 为 $1, 2, 3, \dots$; n 为折射率; z 为波阻抗; l 为样品单元格的厚度。

光电转换效率为

$$\eta = \frac{\int_{400}^{\lambda_g} I(\lambda) A(\lambda) \frac{\lambda}{\lambda_g} d\lambda}{\int_{280}^{4000} I(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

式中: λ 表示入射光波长; $A(\lambda)$ 表示光吸收效率; λ_g 表示硅材料禁带宽度对应的波长,即1100 nm; $I(\lambda)$ 表示入射光的辐照度。

3 模拟结果及分析

3.1 在不同厚度的抗反射膜下光吸收效率随波长的变化关系

图2为通过建模仿真得到的结果,给出了在不同厚度的抗反射膜 SiO_2 下,硅衬底光吸收效率随波长的变化情况。结构参数选取为:球状纳米颗粒直径 $d=200$ nm、阵列周期 $P=200$ nm、硅衬底厚度 $t=500$ nm。抗反射膜 SiO_2 的厚度 h 分别取20、40、60、80、100 nm。

从图2中可以看出,对于不同厚度的抗反射膜,当波长大于500 nm时光吸收效率整体减小,而波长在400~500 nm范围内,光吸收效率先增大后减小,同时光吸收效率在抗反射膜厚度为60 nm时达到最大,因此可将厚度为60 nm的抗反射膜 SiO_2 作为最优厚度。此结果与文献[14]中的结果一致。这是因为在这里抗反射膜 SiO_2 的折射率为1.5,折射率虚部近似为0,所以不需要考虑 SiO_2 对入射光的吸收作用,又因为选取的硅折射

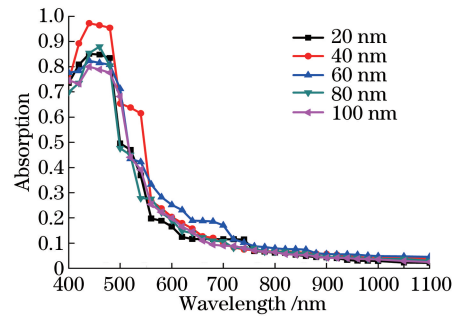


图2 不同厚度的抗反射膜下,光吸收效率随波长的变化关系

Fig. 2 Relationship between light absorption efficiency and wavelength with different thicknesses of anti-reflection film
率虚部在波长大于500 nm时是单调减少,几乎接近于零,所以硅衬底的光吸收一直减小,趋向于零。硅衬底的光吸收主要集中于短波长范围内即400~500 nm之间,图中得到抗反射膜最佳厚度为60 nm。

3.2 不同入射角度及不同入射光波长下硅薄膜光电探测器的光吸收效率

在衬底的厚度、纳米颗粒的尺寸、形状和阵列周期及抗反射膜的厚度、材料的折射率等参数确定的情况下,图3主要研究不同入射角度 θ 及不同入射光波长 λ 下硅薄膜光电探测器的光吸收效率。由文献[8]中可知,当硅表面的颗粒覆盖度较低时,表面等离子激元对硅衬底光吸收的贡献较小;当硅表面的颗粒覆盖度较高时,表面等离子激元对硅衬底光吸收的贡献较大。则在这里主要考虑2种情况,阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值较大(即颗粒覆盖度较低)时和阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值较小时(即颗粒覆盖度较高)。结构参数选取为:硅衬底厚度 $t=500$ nm,抗反射膜 SiO_2 厚度 $h=60$ nm。阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值分为4种情况,分别为 $P=260$ nm、 $d=80$ nm, $P=300$ nm、 $d=80$ nm(表面颗粒覆盖度较低); $P=110$ nm、 $d=100$ nm, $P=150$ nm、 $d=100$ nm(表面颗粒覆盖度较高)。

从图3(c)可知倾斜角度较大时也可得到光吸收效率的最优值。模拟结果解释为,图3(a)和图3(b)的阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值较大时,颗粒覆盖度为20%~30%,对于衬底最佳光吸收的贡献,整体入射光角度范围在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 之间;图3(c)和图3(d)的阵列周期 P 与粒子直径 d 的比值较小时,颗粒覆盖度为60%以上,对于衬底最佳光吸收的贡献,图3(c)的整体入射光角度范

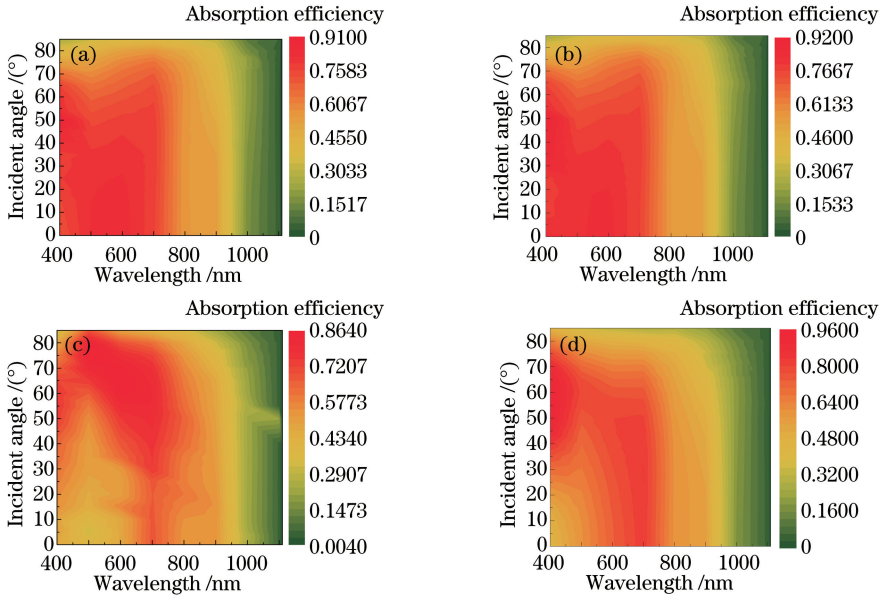


图3 衬底中光吸收效率随入射角度和波长的变化情况。(a) $d=80\text{ nm}$, $P=260\text{ nm}$; (b) $d=80\text{ nm}$, $P=300\text{ nm}$; (c) $d=100\text{ nm}$, $P=110\text{ nm}$; (d) $d=100\text{ nm}$, $P=150\text{ nm}$

Fig. 3 Absorption efficiency in substrate as a function of incident angle and wavelength. (a) $d=80\text{ nm}$, $P=260\text{ nm}$; (b) $d=80\text{ nm}$, $P=300\text{ nm}$; (c) $d=100\text{ nm}$, $P=110\text{ nm}$; (d) $d=100\text{ nm}$, $P=150\text{ nm}$

围在 $0^\circ\sim 85^\circ$ 之间,而图 3(d) 的整体入射角度范围在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 之间。则可以看出,图 3(a) 和图 3(b) 的入射角度范围相对较小,图 3(c) 和图 3(d) 的入射角度范围相对较大。相比于图 3(d),图 3(c) 的入射角范围更大。这说明在硅衬底顶部粒子排布较密即颗粒覆盖度为 90%,入射角度比较大时,硅薄膜光电探测器结构可获得较高的光吸收效率。另外,从图 3(c) 中可以看出,相比其他波段,在波长为 600~800 nm 这个范围之间,光电探测器的光吸收效率较高。

3.3 不同入射光照方向对硅衬底的光反射率、透射率及吸收率的影响

在确定好结构参数为 $P=110\text{ nm}$ 、 $d=100\text{ nm}$ 的基础上,当波长在 600~800 nm 范围内的光入射到厚度为 500 nm 的硅薄膜光电探测器时,计算光波入射到硅衬底的反射率、透射率及吸收率。图 4 为在入射光波长分别为 700 nm 和 800 nm 时,不同入射光照方向对硅衬底的光反射率(R)、透射率(T)及吸收率(absorption)影响。图 4(a) 和图 4(b) 为硅表面存在球状 Ag 纳米颗粒和抗反射膜 SiO_2 时的光吸收,图 4(c) 和图 4(d) 为硅表面无纳米颗粒和抗反射膜 SiO_2 时的光吸收。结构参数选取为:硅衬底厚度 $t=500\text{ nm}$ 、抗反射膜 SiO_2 厚度 $h=60\text{ nm}$ 、阵列周期 $P=110\text{ nm}$ 、纳米颗粒直径 $d=100\text{ nm}$ (即硅薄膜光电探测器表面的颗粒覆盖度较密的情况下),图 4(a)、(c) $\lambda=700\text{ nm}$,图 4(b)、(d) $\lambda=800\text{ nm}$ 。

在图 4(a) 和图 4(b) 中,表面存在球状 Ag 纳米颗粒和抗反射膜 SiO_2 时,硅薄膜的光反射率及透射率值较小,相应的光吸收值较大。在图 4(c) 和图 4(d) 中,表面没有球状 Ag 纳米颗粒和抗反射膜 SiO_2 时,硅薄膜的光反射率及透射率值较大,相应的光吸收值较低。相比于图 4(b)~(d),图 4(a) 中可以看出,在波长为 700 nm 处,入射光被反射和透射的相对较少,吸收量占入射光能量的很大一部分,且入射角在 $0^\circ\sim 65^\circ$ 范围内,光吸收率保持在 65% 以上,而当入射角超过 65° 时,光吸收率会趋于下降。而从图 4(c) 中可以看出,入射光波长为 700 nm 时,在入射角为 $0^\circ\sim 85^\circ$ 范围内,光吸收率一直保持在 5% 左右。此结果表明引入 Ag 纳米颗粒阵列和抗反射膜 SiO_2 后光电探测器在不同入射角度下的光吸收率都有不同程度的提高,其中在波长为 700 nm 处光吸收率较裸硅光电探测器可提高 60%,且最佳入射角度范围为 $0^\circ\sim 65^\circ$ 。很显然,这一结果可用于调节硅衬底的光吸收而无须改变衬底的厚度、纳米颗粒的尺寸、形状、阵列周期等因素。

3.4 光电探测器 x - z 截面上的电场模量 $|E|$ 分布图

图 5 为光电探测器 x - z 截面上的电场模量 $|E|$ 分布图,其中图 5(a)~(d) 分别对应图 4(a)~(d) 箭头标示的角度(即 0°)。图 5(c) 和图 5(d) 为只有硅衬底时的电场强度分布,硅衬底顶部空气层

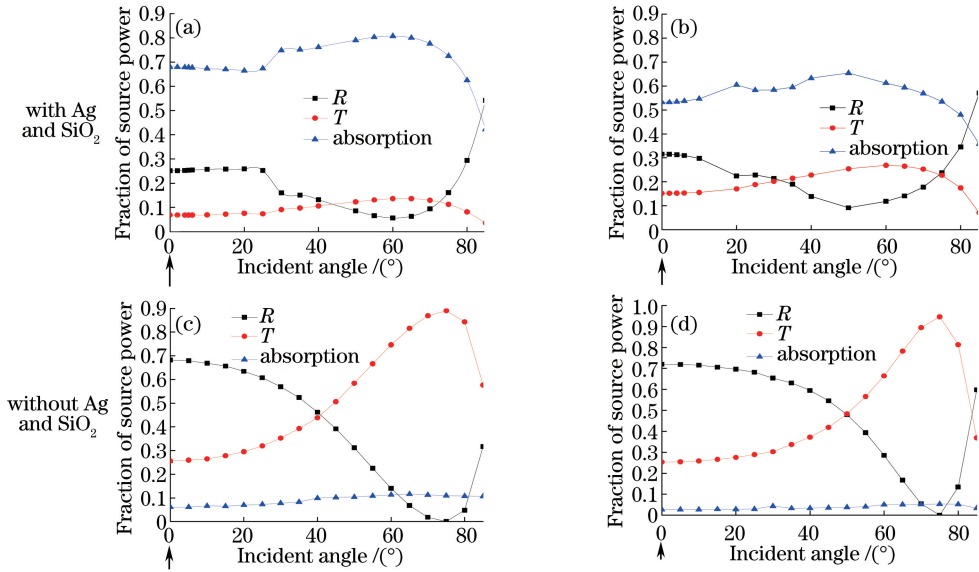


图 4 $d=100\text{ nm}, P=110\text{ nm}$ 时,吸收率、反射率和透射率随入射角度的变化情况。(a)(c) $\lambda=700\text{ nm}$; (b)(d) $\lambda=800\text{ nm}$
 Fig. 4 Variations in absorption efficiency, reflection efficiency, and transmission efficiency with incident angle when $d=100\text{ nm}$ and $P=110\text{ nm}$. (a)(c) $\lambda=700\text{ nm}$; (b)(d) $\lambda=800\text{ nm}$

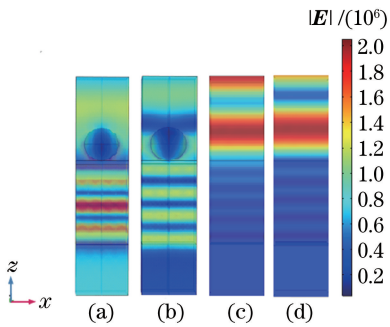


图 5 各箭头标示的角度处光电探测器 $x-z$ 截面上电场模量 $|E|$ 分布图。(a)(b)纳米结构;(c)(d)裸硅
 Fig. 5 Electric field modulus $|E|$ distributions of $x-z$ cross section at the angle indicated by each arrow in Fig. 4. (a) (b) Nano-structure; (c) (d) bare silicon

的电场强度与硅衬底内部相比明显偏大,表明入射光很大一部分被反射回去。图5(a)和图5(b)为在

硅衬底顶部加上球状金属 Ag 纳米颗粒和抗反射膜时的电场强度分布,纳米颗粒周围的电场显著增强,表明金属 Ag 纳米颗粒产生了局域等离子共振,且由于金属 Ag 纳米颗粒具有强散射特性,入射光很大一部分被散射到硅衬底内部,与裸硅相比,反射率和透射率明显降低,吸收率明显提高。对于图 5(b),入射光与硅衬底导波模式的耦合效率较低,导致光吸收率相对较低。

3.5 光电探测器的光电转换效率

通过设计纳米微结构可增强光电探测器的光吸收,并且在很大程度上可转化为电能,从而有效提高光电探测器的转换效率。总的效率等于某个波长的能量占总能量的比例乘以该波长的效率最后再进行求和,首先根据(8)式求出裸硅光电探测器和 $P=110\text{ nm}, d=100\text{ nm}$ 结构中每个波长所对应的效率,如表 1 和表 2 所示。

表 1 裸硅光电探测器的不同波长对应的效率

Table 1 Efficiency of bare silicon photodetector at different wavelengths

Wavelength /nm	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Efficiency	0.374740	0.541450	0.513370	0.408810	0.240640	0.207180	0.066734	0.189550

表 2 等离激元光电探测器的不同波长对应的效率

Table 2 Efficiency of plasmon photodetector at different wavelengths

Wavelength /nm	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Efficiency	0.082849	0.317213	0.629370	0.741937	0.650520	0.582073	0.305191	0.070480

在有限元软件中通过积分求出每个波长的能量占整个光谱能量的百分比,最后求出总的光电转换

效率,模拟仿真结果表明,厚度为 500 nm 的裸硅光电探测器的光电转换效率达 29% ,而表面有球状

Ag 纳米颗粒的硅薄膜光电探测器转换效率可达 34%，这表明与裸硅光电探测器相比，在表面有球状 Ag 纳米颗粒阵列的硅薄膜光电探测器结构中，光电转换效率得到很大提升。Jeong 等^[15]的研究结果表明，在厚度为 10 μm ，上表面具有纳米锥结构的薄晶硅电池中，转换效率达到了 13.7%。Spinelli 等^[16]的研究结果表明，在厚度为 20 μm ，上表面具有纳米柱阵列的薄晶硅电池中，转换效率达到了 21.5%。通过比较，在硅薄膜表面设计不同的纳米结构，得到的光电转换效率是不同的，并且这种球形纳米结构的设计可以有效地增强硅衬底的光吸收，提高光电探测器的转换效率。

4 结 论

基于有限元原理的数值模拟方法，针对上表面具有周期性的球状 Ag 纳米颗粒阵列的硅薄膜光电探测器结构，研究球状 Ag 纳米颗粒阵列对光电探测器光吸收性能的影响。结果发现光电探测器的光吸收效率受入射光角度的影响，可实现宽角度范围的吸收增强效果。通过优化结构，入射光角度范围为 $0^\circ \sim 65^\circ$ 时表面有金属纳米结构的硅光电探测器比裸硅光电探测器光吸收效率提高约为 60%。显著增强的光吸收对提高光电探测器的光电转换效率十分有利。但是因为模型的局限性，对于光电探测器的其他特性还未涉及到，所以仍需要对光电探测器做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Zhu Z D, Bai B F, Tan Q F, *et al.* Resonance property of the surface plasmonic device of double stacked nanocone [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0934001.
朱振东, 白本锋, 谭峭峰, 等. 叠层圆柱台表面等离激元器件的共振特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0934001.
- [2] Wang W S, Zhang L W, Zhang Y W. Surface plasmon waveguide and its applications[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 329-339.
王五松, 张利伟, 张治文. 表面等离子波导及应用[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 329-339.
- [3] Zhang Y J, Yang S E, Cheng Y S, *et al.* The study of the metal nanoparticle light scattering [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(3): 721-725.
张宇杰, 杨仕娥, 陈永生, 等. 金属纳米颗粒光散射特性研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(3): 721-725.

- [4] Luo D B, Liu J K, Wu C, *et al.* Theoretic consideration for enhancing the light trapping of the thin-film photovoltaic cell by light scattering of metal nanoparticles[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2013, 31(1): 151-154.
罗道斌, 刘建科, 吴超, 等. 金属纳米颗粒光散射提高薄膜光伏电池光能吸收率的理论研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2013, 31(1): 151-154.
- [5] Schaadt D M, Feng B, Yu E T. Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(6): 063106.
- [6] Beck F J, Polman A, Catchpole K R. Tunable light trapping for solar cells using localized surface plasmons[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(11): 114310.
- [7] Yin Y X, Yu Z Y, Liu Y M, *et al.* Design of plasmonic solar cells combining dual interface nanostructure for broadband absorption enhancement [J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 213-218.
- [8] Ding D, Yang S E, Chen Y S, *et al.* Numerical simulation of light absorption enhancement in microcrystalline silicon solar cells with Al nanoparticle arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 248801.
丁东, 杨仕娥, 陈永生, 等. Al 纳米颗粒增强微晶硅薄膜太阳能电池光吸收的模拟研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 248801.
- [9] Liu X J, Jia L J, Fan G P, *et al.* Au nanoparticle enhanced thin-film silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 147: 225-234.
- [10] Lai S M, Huang Z W, Wang Y J, *et al.* Simulation and analysis of local surface plasmon resonance of Ag nanostructures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 122601.
赖淑妹, 黄志伟, 王仰江, 等. Ag 纳米结构局域表面等离激元共振模拟与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 122601.
- [11] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 1985: 350-351.
- [12] Yang M. Localized surface plasmon and optical absorption enhancement in metallic nanoparticles[D]. Beijing: Peking University Press, 2013: 22-23.
杨萌. 金属纳米颗粒的局域表面等离激元及光吸收增强[D]. 北京: 北京大学, 2013: 22-23.
- [13] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, *et al.* Design,

- theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(12): 125104.
- [14] Liu Z, Wang Y X, Song Y L, *et al.* Nano surface two-dimensional periodic half-round grooves enhanced light absorption in silicon film solar cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(16): 167801.
刘震, 王玉晓, 宋瑛林, 等. 纳米表面二维周期半圆凹槽增强硅薄膜太阳能电池光吸收 [J]. *物理学报*, 2013, 62(16): 167801.
- [15] Jeong S, McGehee M D, Cui Y. All-back-contact ultra-thin silicon nanocone solar cells with 13.7% power conversion efficiency [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2950.
- [16] Spinelli P, Polman A. Light trapping in thin crystalline Si solar cells using surface mie scatterers [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(2): 554-559.