

doi:10.3788/gzxb20184707.0705001

固定体积比例下 Ag 纳米线对不同光栅结构吸收的影响

陈科,方旭,郑红梅,吴睿,汪园园

(合肥工业大学 机械工程学院;安徽省数字化设计与制造重点实验室,合肥 230009)

摘 要:为了研究 Ag 纳米线对单晶硅薄膜太阳能电池光吸收效率的影响,设计了固定体积比例下具有三角形光栅和矩形光栅的单晶硅薄膜太阳能电池结构.在两种结构的 Ag-Si 交界处分别添加横向截面为圆形和矩形的 Ag 纳米线阵列,利用有限时域差分法分别模拟计算了这两种结构的太阳能电池和对照组的吸收光谱.通过扫描优化得到两种光栅结构的最佳高度、纳米线横截面积以及分布密度,并计算出最优条件下 300~1 100 nm 波段的光吸收效率.通过分析光吸收增强谱和电磁场强度分布图得出了含有纳米线模型在长波段的吸收增强机理.结果表明,添加了 Ag 纳米线后的两种太阳能电池模型均比两种对照组模型具有更好的光捕获和吸收作用,在矩形光栅模型中添加 Ag 纳米线后吸收效率的提升要比三角形光栅模型中更为明显.研究结果可为新型太阳能电池的结构参数设计提供参考.

关键词:光电子学;光吸收;有限时域差分法;Ag 纳米线;硅薄膜太阳能电池;短路电流密度

中图分类号:TK514

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)07-0705001-10

Influence of Ag Nanowires on Optical Absorption of Different Grating Structures under Fixed Volume Ratio

CHEN Ke, FANG Xu, ZHENG Hong-mei, WU Rui, WANG Yuan-yuan

(Digital Design and Manufacture Key Laboratory of Anhui Province, College of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the influence of Ag nanowires on the light absorption efficiency of crystalline silicon thin film solar cells, a kind of crystalline silicon thin film solar cell structure with triangular grating and rectangular grating at fixed volume ratio was designed. At the Ag-Si junction of the two structures, a circular and rectangular Ag nanowire array were added respectively. The absorption spectra of these two structures and the control group were simulated by finite difference time-domain method. The optimal height, nanowire cross-sectional area, and distribution density of the two grating structures were obtained by sweeps function of finite difference time-domain method software, and the light absorption efficiency of wavelength region of 300~1 100 nm was calculated under the optimal conditions. The absorption enhancement mechanism of the nanowire model in the long wavelength band was obtained by analyzing the light absorption enhancement spectra and the electromagnetic field intensity distribution. The results showed that the two structures with Ag nanowires had better light capture and absorption than the two control groups. Moreover, the absorption efficiency of Ag nanowires in the rectangular grating model is improved more significantly than the triangular grating model, which can provide reference for the design of structural parameters of new solar cells.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.51435003)资助

第一作者:陈科(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为机电产品的现代化设计理论和方法.Email:K.Chen@163.com

通讯作者:郑红梅(1966-),女,教授,博士,主要研究方向为传感器及测控技术、机械系统动力学.Email:ColorfuLemonFX@163.com

收稿日期:2017-11-02;录用日期:2017-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Optoelectronics; Light absorption; Finite difference time-domain method; Ag nanowire; Silicon thin film solar cell; Short circuit current density

OCIS Codes: 050.2230; 050.2770; 310.6845; 250.5403; 220.2740

0 引言

随着新能源的开发和利用,太阳能电池成为利用太阳能的重要产物^[1-3].由于传统太阳能电池的吸收效率非常低,因此,光吸收效率一直是太阳能电池研究的重点.在当今薄膜太阳能电池研究领域中,利用硅半导体来制造薄膜太阳能电池是非常简单又直接的方法^[4].然而,由于长波段的光被充分吸收所需要传输的距离远大于薄膜太阳能电池的厚度,所以薄膜太阳能电池存在转换效率低下的问题^[5].

为了提高吸收效率,研究者们通过改变光栅结构来使金属光栅表面与半导体结合从而产生等离子激元共振(Surface Plasmon Resonances, SPRs)模式^[6-8].2010年,德克萨斯大学奥斯汀分校的WANG W等提出一种ITO-Si-Ag的太阳能电池模型,下方分布了Ag矩形光栅,通过改变矩形光栅的宽度对该模型进行优化,最终发现该模型比平板太阳能电池对照组的光吸收效率提升了30%^[9].2013年,郑州大学孙晓红教授等将太阳能电池的非晶硅吸收层雕刻成一维矩形光栅结构,该结构在300~700 nm波长段的光吸收效率相对平板吸收结构的光吸收效率最大提升达到58.3%^[10].2015年,孟加拉工程技术大学AWAL M A等设计了一种吸收层厚度为300 nm的顶部有一维周期硅光栅光伏结构,将顶部的硅与下方银接触,这种双层混合陷光结构使得光吸收效率在宽波段上提高了46%^[11].2016年,华中科技大学程强教授等提出了一种二维硅光栅和锗纳米棒的组装光伏吸收结构,在300~1 100 nm波长段的光吸收效率比只有硅光栅的结构的光吸收效率有明显的提高^[12].

研究者们对太阳能电池中等离子激元结构的设计有着比较深入的研究,等离子激元光子学的研究内容是金属纳米结构独特的光学性质及其应用^[13-15].2014年,武汉理工大学许文英提出在太阳能电池Si吸收层中添加Ag₂O₃金属颗粒,并且通过改变颗粒半径,得到不同位置的等离子激元共振吸收峰^[16].2015年,南京大学固体与微结构物理国家重点实验室通过纳米粒子束流气相沉积方法控制Ag纳米颗粒在衬底层的分布,研究发现表面等离子激元共振波长的变化与随纳米粒子沉积量增加而增加的紧密相邻的纳米粒子对的百分数相关^[17].

除了通过将普通形状的光栅(矩形、三角形等)进行简单的叠加、阵列等来改变光栅结构外,还有学者通过改变硅表面形状的方法来研究太阳能电池吸收效率.2012年,上海交通大学冯仕猛教授等提出将多晶硅表面制绒的陷光模型,并比较了表面布满凹陷的U字型陷阱坑和V字型陷阱坑的反射率^[18].2013年,哈尔滨工业大学李美成教授等为了研究硅纳米线阵列的减反性能分别测试了平板硅金字塔、多孔硅与硅纳米线阵列的反射光谱,发现硅纳米线的减反效果最好^[1].在之前的研究工作中,我们也设计了一种一维双层余弦光栅结构的单晶硅太阳能电池,通过计算发现余弦光栅结构比矩形光栅结构的吸收效率更高^[20].

Ag纳米线具有一定的光捕获和吸收增强作用^[13,17],然而,有部分学者在设计太阳能电池结构时不仅添加了Ag纳米线,同时还改变了光栅的占空比,从而改变了Si吸收层的体积^[20].随着Si吸收层体积的改变,太阳能电池的光吸收效率也会改变,导致在分析计算结果时不易判断Ag纳米线对太阳能电池结构光吸收的影响.因此,本文设计了一种在固定体积比例下在Ag-Si光栅交界处添加Ag纳米线的薄膜太阳能电池结构.通过设置对照组,分别计算了在三角形光栅和矩形光栅太阳能电池结构中添加Ag纳米线对光吸收的影响.并通过扫描优化,控制光栅高度、Ag纳米线横向宽度以及数目得出最佳光吸收效率.

1 薄膜太阳能电池结构

图1为薄膜太阳能电池的平面结构模型.材料由上到下分别为ITO(In₂O₃-SnO₂)层、c-Si层和Ag层.图1(a)为平板结构对照组(P-Thin Film Solar Cell, P-TFSC).图1(b)、(e)为含有三角形光栅(Tri-TFSC)和矩形光栅的太阳能电池(Rect-TFSC)对照组.图1(c)、(g)分别在图1(b)、(e)对照组模型上沿Ag-Si交界处添加了横截面为圆形的Ag纳米线,即为含有纳米线阵列的三角形光栅结构(Tri-TFSC-CAg)和矩形光栅结构(Rect-TFSC-CAg).在图1(d)中,将矩形纳米线沿着边界线添加至模型中,添加的纳米线横截面为正方形,正方形中心坐标与图1(c)中圆形纳米线圆心坐标相同(Tri-TFSC-RAg).在图1(f)、(g)中,将纳米线均

匀添加至三个边,分别形成含有横截面为圆形和矩形 Ag 纳米线的矩形光栅(Rect-TFSC-CAg&Rect-TFSC-RAg).模型宽度为 $D=500\text{ nm}$,光栅高度为 H ,除去 ITO 层的高度为 L ,ITO 层厚度为 20 nm .光栅结构周期 P 均为 125 nm .图 1 中 7 种模型在水平方向均具有周期性,因此,模拟计算区域取一个周期.取模型水平方向正中间的一个周期作为模拟计算区域.矩形光栅中 Ag 宽度与 Si 宽度相同.由于添加的纳米线横截面积很小,所以所有模型中,Ag 层与 Si 层的体积比例近似等于 $1:1$.

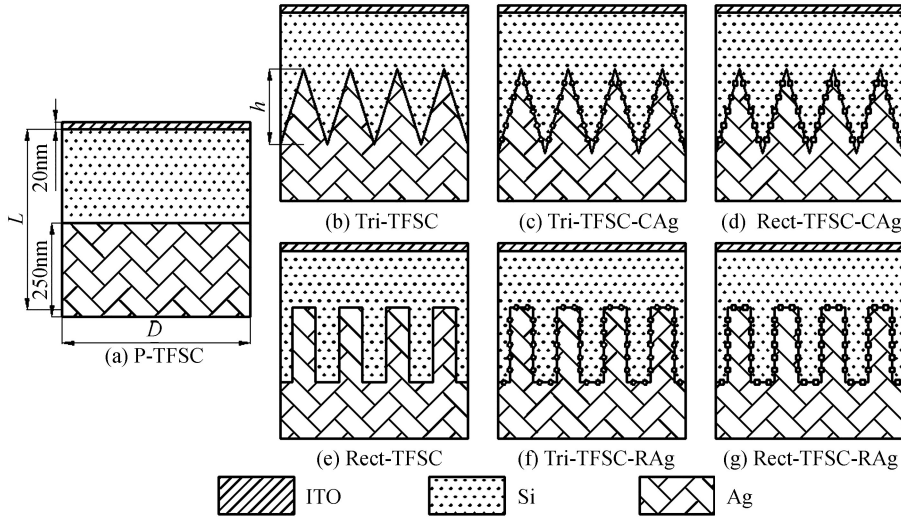


图 1 薄膜太阳能电池平面结构示意图
Fig.1 Thin film solar cell plane structure diagram

2 数值模拟与分析

使用有限时域差分法(Finite Difference Time-Domain, FDTD)对图 1 中的模型进行模拟仿真分析.入射光为 AM1.5 光谱.通过 FDTD Solution 软件控制模型 Si 吸收层.由于 Si 层不同的厚度对太阳能电池光吸收影响较大,因此在优化过程中控制 Si 层总体积基本不变.主光栅控制光栅高度 H ,纳米线控制其分布密度和几何参数,其中,圆形截面控制半径,矩形截面控制边长(统一用 r 表示).通过扫描优化的短路电流结果可以得出:三角形光栅最佳高度为 160 nm ,矩形光栅最佳高度为 110 nm .在图 1(c)和(d)模型中,控制的变量有 Ag 纳米线的半径(图 1(d)模型中为正方形边长)和一条边上 Ag 纳米线数量 M .在图 1(g)和(h)模型中,变量同样为 Ag 纳米线的边长和数量.但由于矩形光栅模型有三个边,因此在扫描优化过程中令底边、侧边和顶边纳米线数量分别为 J, K, M .通过 FDTD 仿真计算得到的优化结果见表 1.其中 r 为半径, r' 为正方形纳米线模型中对应的边长.表中变量值为“/”表示在该模型中没有对应的变量,不需要优化.如图 1(c)中,由于三角形光栅两边对称,因此只考虑一条边上纳米线的数量 M .)

表 1 7 种太阳能电池模型优化结果

Table 1 Optimized results of 7 kinds of solar cell

Solar-cell	H/nm	$r (r')/\text{nm}$	J	K	M
P-TFSC	/	/	/	/	/
Tri-TFSC	160	/	/	/	/
Tri-TFSC-CAg	160	3	/	/	15
Tri-TFSC-RAg	160	6	/	/	13
Rect-TFSC	110	/	/	/	/
Rect-TFSC-CAg	110	4	4	6	6
Rect-TFSC-RAg	110	6	4	7	8

2.1 光吸收效率与归一化光吸收密度分析

图 2 和图 3 为 7 种结构(图 1(a)~(g))的太阳能电池在 AM1.5 光照下 Si 层吸收光谱.可以看出,这 6 种结构(图 1(b)~(g))的光吸收效率相对于平板结构均有明显提高.其中,在 $300\sim 700\text{ nm}$ 波长段没有太多的吸收增强,但是在 $700\sim 1100\text{ nm}$ 波长段光谱出现很多波峰,吸收效率明显提高.从图 3(d)、(f)中可以看到,

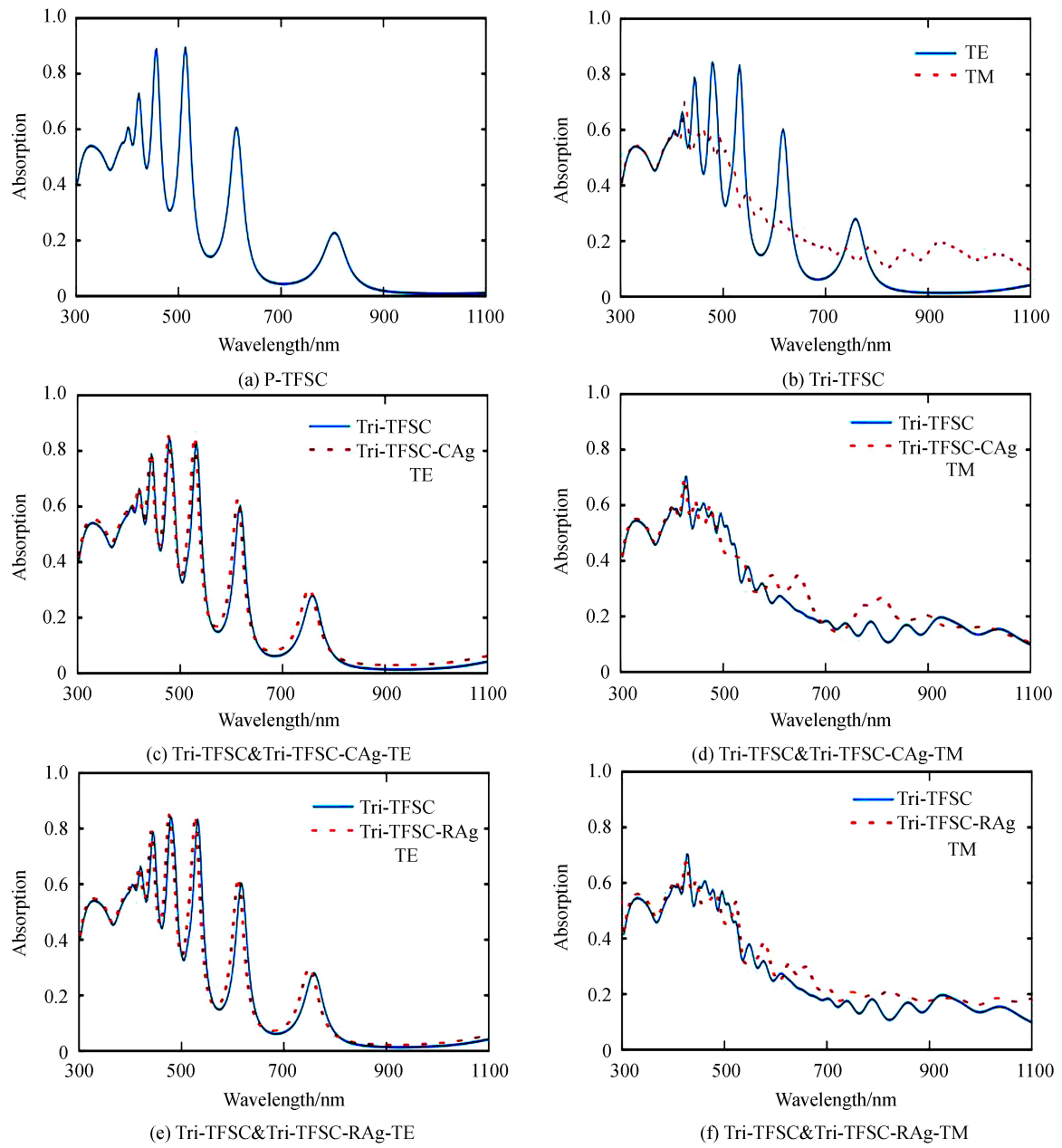
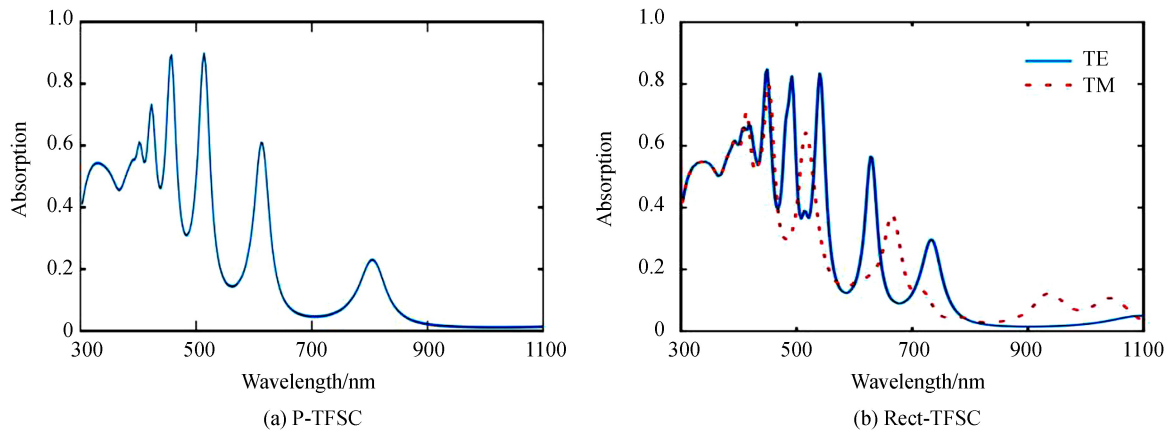


图2 三角形光栅结构的吸收光谱

Fig.2 Absorption spectra of triangular gratings



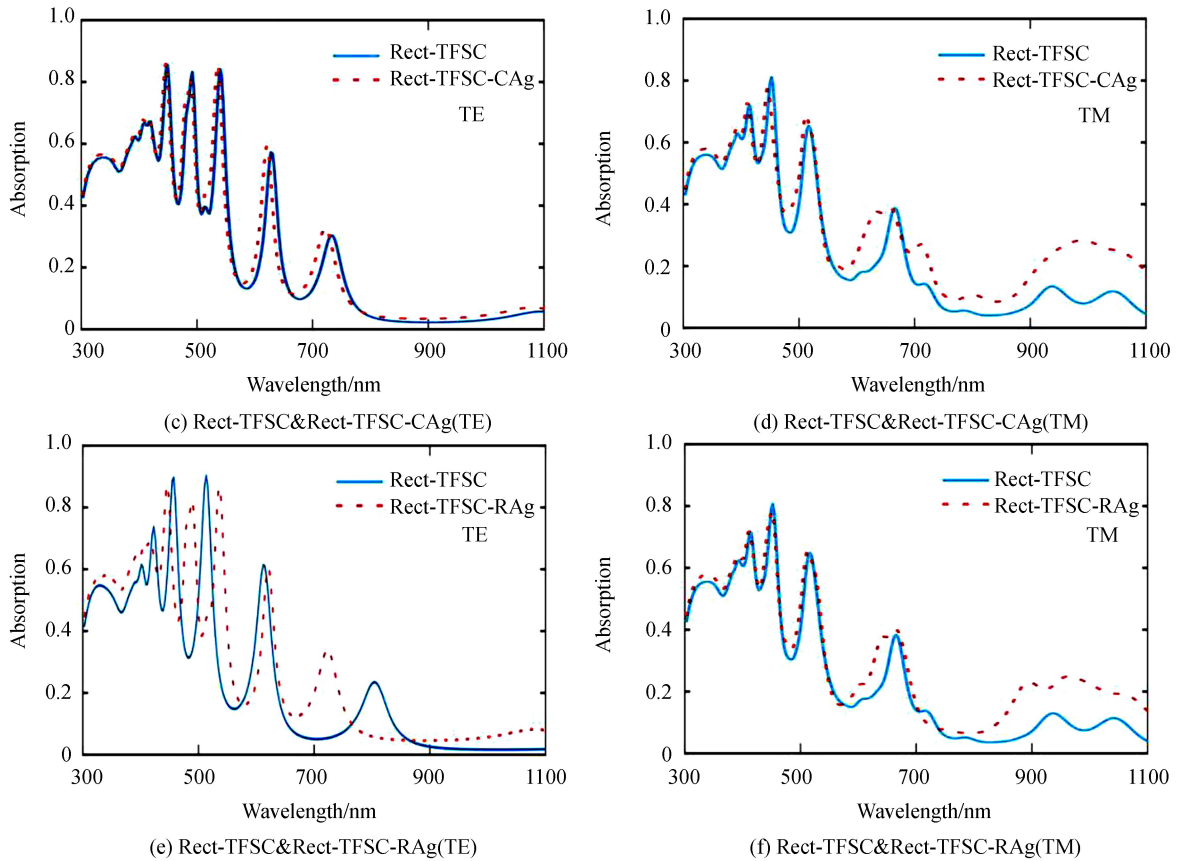


图 3 矩形光栅结构的吸收光谱

Fig.3 Absorption spectra of rectangular gratings

在矩形光栅 Ag-Si 边界处由于添加了 Ag 纳米线,使得 TM 偏振光下长波段光吸收有明显增强.图 3(e)中,光吸收效率谱的波峰在中长波段出现了红移现象.

为了进一步分析这 6 种结构在 300~1 100 nm 波长段的光吸收效率,根据式(1)分别计算了 300~700 nm 和 700~1 100 nm 两个波长段的归一化光吸收密度.结果如图 4.

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \quad (1)$$

式中, λ_{\min} 和 λ_{\max} 为波长段的最小波长和最大波长值, $P_{\text{abs}}(\lambda)$ 为波长 λ 时光吸收效率.

从图 4(a)中可以看到在 300~700 nm 波长段,矩形光栅在 TE 偏振光下的光吸收效率要比三角形光栅效果好;而在 TM 偏振光下三角形光栅的光吸收效率比矩形光栅效果好.并且在 TM 偏振光下,含有纳米线的 Tri-TFSC 和 Rect-TFSC 模型的光吸收均比没有纳米线的模型有一定的增强.从图 4(b)中可以看出在 700~1 100 nm 波长段,三角形光栅和矩形光栅在 TE 偏振光下的吸收没有明显差别,甚至在添加了 CAg 和 RAg 纳米线后也没有明显差别.在 TM 偏振光下可以看出:1)三角形光栅模型下的光吸收效率比矩形光栅模型下的光吸收效率要高出很多;2)两种模型分别添加了 CAg 和 RAg 纳米线后,光吸收效率都有明显增强;3)分别添加了 CAg 和 RAg 纳米线后,尽管三角形光栅模型下的光吸收效率还是高于矩形光栅模型,但是两种模型的吸收差距明显缩小了很多,换言之,尽管在添加了纳米线后矩形光栅模型的光吸收效率还是比三角形光栅略低一些,但是添加 Ag 纳米线使得矩形光栅的光吸收效率提升的更明显;4)含有 CAg 纳米线太阳能电池结构吸收效果比含有 RAg 纳米线的吸收效果要好.从图 4(c)中可以看到在非偏振光条件下,矩形光栅模型在短波段的光吸收效率比三角形光栅模型效果好,三角形光栅模型在长波段光吸收效果比矩形光栅模型好.

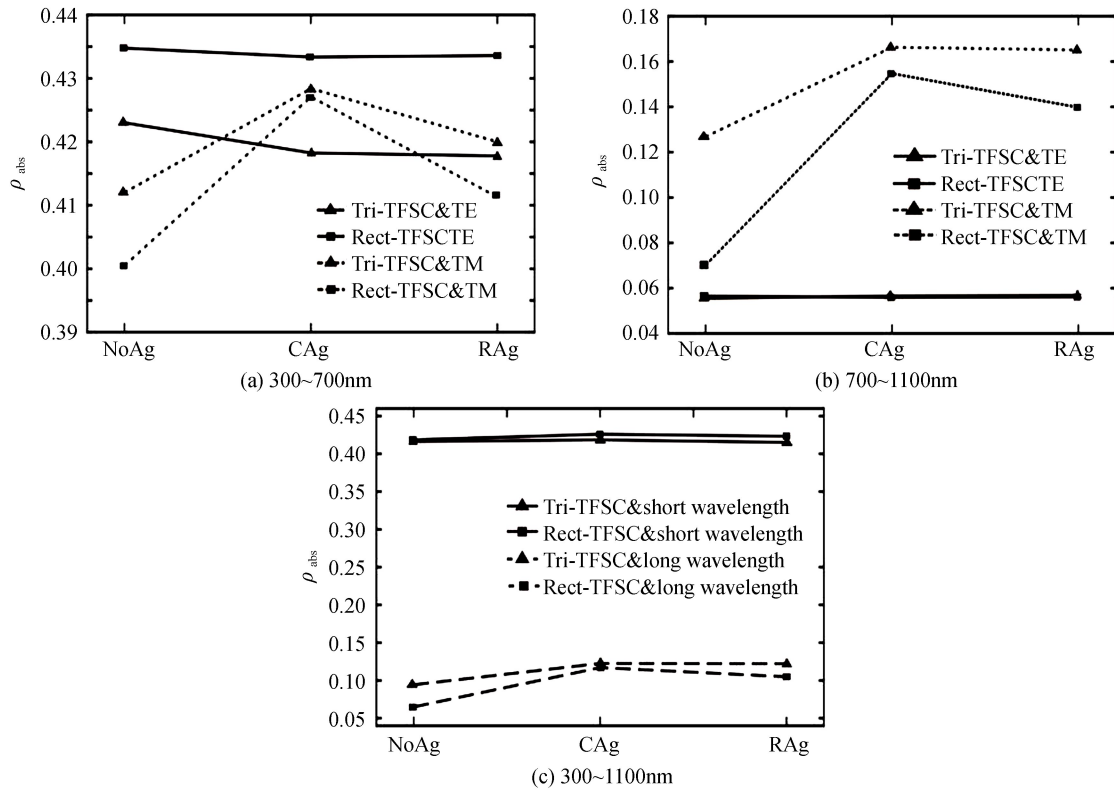


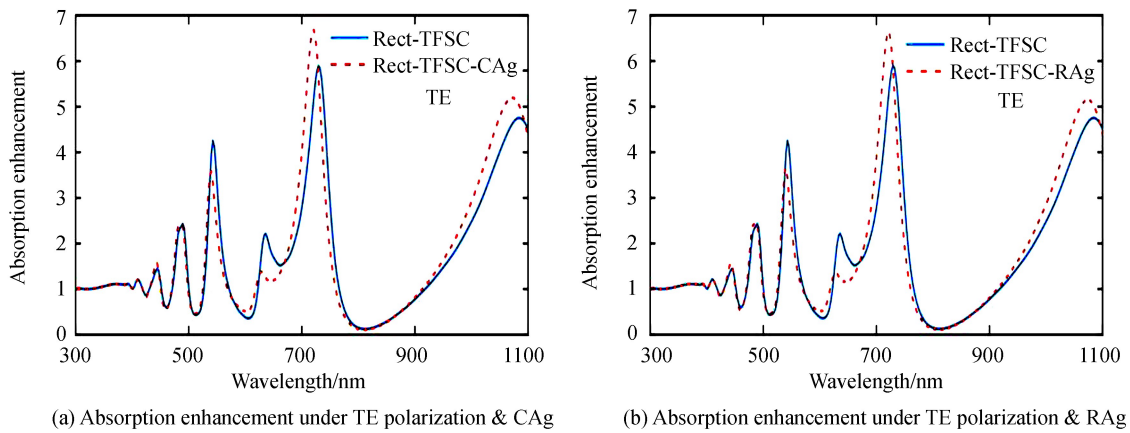
图4 AM1.5 光照下的归一化光吸收密度曲线

Fig.4 Normalized optical absorption density curves under AM1.5 illumination

2.2 光吸收增强谱与电磁场强度分布图

由图 3 和图 4 已经得知,在矩形光栅太阳能电池模型中添加 Ag 纳米线后光吸收提升效果更为明显,这种增强主要是由于 TM 偏振光下长波段的光吸收增强,为了进一步分析 Rect-TFSC-CAg 和 Rect-TFSC-RAg 两种模型的光吸收增强机理,将 Rect-TFSC-CAg 和 Rect-TFSC-RAg 两种模型分别于 TE 和 TM 偏振光条件下与平板模型做对比,得到光吸收增强谱,如图 5.

可以看出,在 TM 偏振光下 Rect-TFSC-CAg 和 Rect-TFSC-RAg 模型长波段光吸收增强远远高于 Rect-TFSC 模型.在图 5(a)中取 721 nm 波长点、图 5(b)中取 715 nm 波长点来分析电场强度的分布;在图 5 (c)中选取 996 nm 波长点、图 5(d)中选取 980 nm 波长点来分析磁场强度的分布.电磁场分布图结果见图 6.



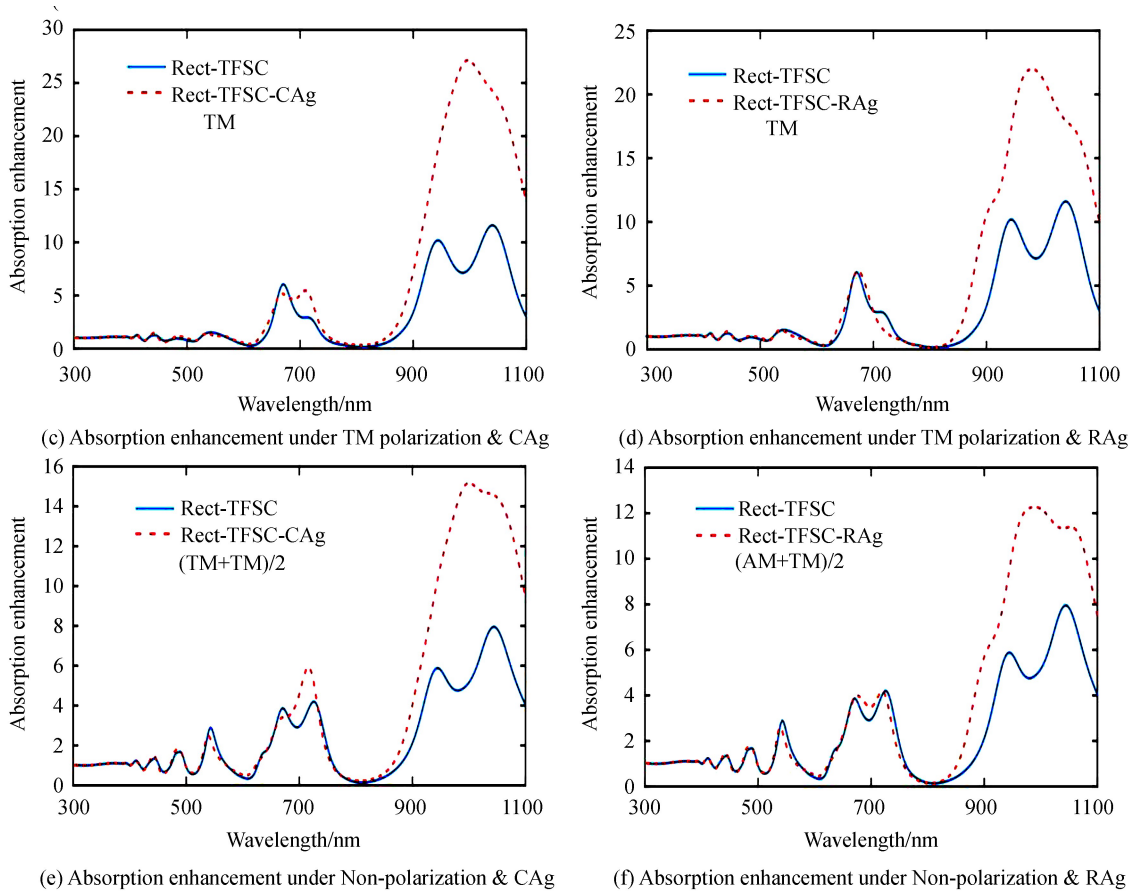
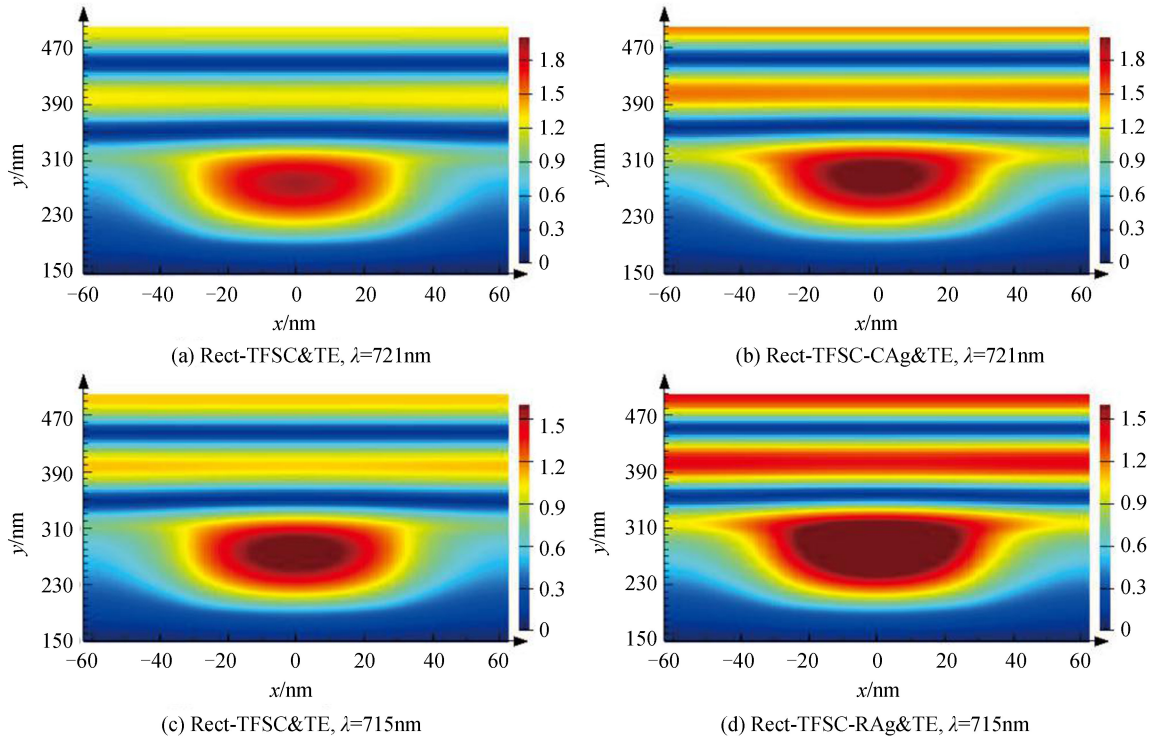


图 5 Rect-TFSC-CAG 和 Rect-TFSC-RAg 模型光吸收增强谱
Fig.5 Absorption enhancement spectra of Rect-TFSC-CAG and Rect-TFSC-RAg model



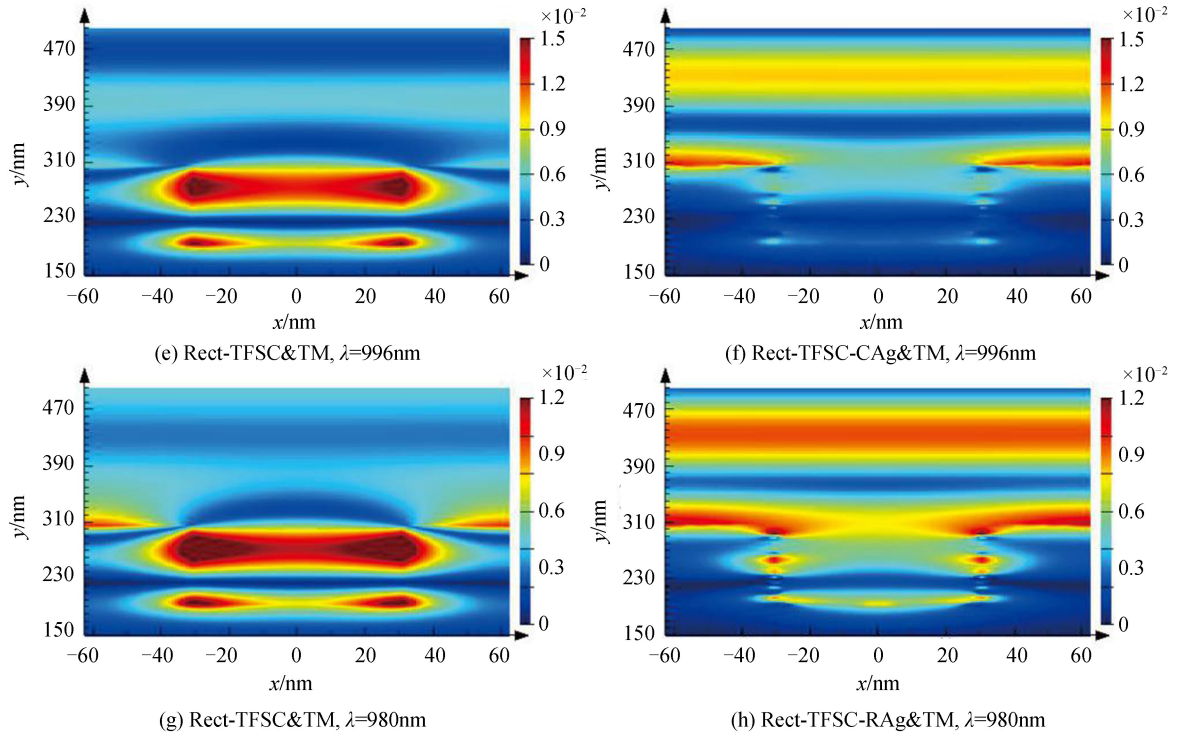


图6 部分波长点下电磁场强度分布图

Fig.6 Electromagnetic field distributions at different wavelength

从图6(a)~(d)中可以看出,在721 nm波长处 Rect-TFSC-CAg模型的电场分布图要明显强于 Rect-TFSC模型,在715 nm波长处 Rect-TFSC-RAg模型的电场分布图也明显强于 Rect-TFSC模型.这两个波长点在含有 Ag 纳米线的模型中, Si 层中出现了两处非常强的电场分布.这两道强电场层也对应了图5中 TE 偏振光下两种模型的两个最高点.从图6(e)~(h)中可以看出,在996 nm和980 nm这两个波长点上,尽管添加 Ag 纳米线后的模型底层 Si 的磁场强度有一定程度的减弱,但是 Si 层上部的磁场强度得到了大幅度的提升.这是由于在 Si 层上部出现法布里珀罗谐振增强的缘故^[21-22].这也对应了图5中 TM 偏振光下 Rect-TFSC-CAg模型和 Rect-TFSC-RAg模型的吸收增强倍数远远高于 Rect-TFSC模型.

2.3 短路电流密度

图1中7种单晶硅薄膜太阳能电池模型的短路电流密度的计算公式为

$$J_{sc} = e \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{P_{abs}(\lambda) \times SP(\lambda)}{E_e(\lambda)} d\lambda \quad (2)$$

式中, e 为电子电量, $E_e(\lambda)$ 是波长为 λ 的单个光子的能量, $SP(\lambda)$ 是 AM1.5 光谱. 计算结果见表2.

表2 短路电流密度

Table 2 Short-circuit current density	
Solar cell	$J_{sc} / (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
P-TFSC	8.494
Tri-TFSC	9.993
Tri-TFSC-CAg	10.459
Tri-TFSC-RAg	10.329
Rect-TFSC	9.027
Rect-TFSC-CAg	10.249
Rect-TFSC-RAg	9.983

由表 2 可以得出,光吸收效果最好的模型为 Tri-TFSC-CAg,此模型比 P-TFSC 模型的短路电流密度提升了 23.1%,比 Tri-TFSC 模型的短路电流密度提升了 4.7%。通过添加 Ag 纳米线后吸收效果提升最大的模型为 Rect-TFSC-CAg,此模型比 P-TFSC 模型的短路电流密度提升了 20.7%,比 Rect-TFSC 模型的短路电流密度提升了 13.5%。从图 7 中可以明显看出三角形光栅模型短路电流密度比矩形光栅模型的要大,CAg 纳米线效果比 RAg 纳米线效果要好。但是矩形光栅添加 CAg 和 RAg 纳米线后短路电流密度的提升幅度更大。

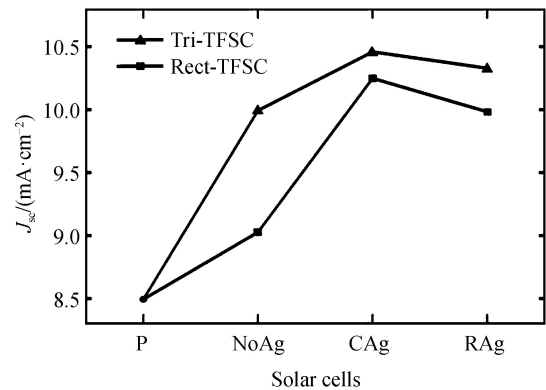


图 7 短路电流密度曲线

Fig.7 Short-circuit current density curves

3 结论

本文在优化了高度之后的三角形光栅和矩形光栅薄膜太阳能电池的基础上设计了一种在 Ag-Si 交界处添加 Ag 纳米线阵列的薄膜太阳能电池结构。为了排除 Si 层厚度对太阳能电池光吸收的影响,所有模型中 Ag 与 Si 的体积比均为 1:1。通过优化 Ag 纳米线阵列的形状、横截面积和分布密度最终确定了三角形光栅和矩形光栅下的最优纳米线阵列,并模拟计算了薄膜太阳能电池的光吸收效率谱。运用归一化光吸收密度和光吸收增强谱分别对 7 种结构的太阳能电池在 300~700 nm 波长段和 700~1100 nm 波长段的光吸收效率进行了对比分析。结果表明:

1) 在没有添加 Ag 纳米线阵列的情况下,最优高度下三角形光栅模型的光吸收效率明显高于最优高度下矩形光栅模型的光吸收效率。

2) 在添加了 Ag 纳米线阵列后,两种模型的光吸收效率都有明显的增加,其中 Tri-TFSC-CAg 模型的光吸收效率最高,该模型的短路电流密度比 P-TFSC 模型提升了 23.1%。

3) 在添加了 Ag 纳米线阵列后,三角形光栅模型的光吸收效率仍比矩形光栅模型高,但是矩形光栅在添加 Ag 纳米线后的光吸收增强幅度明显更大。其中 Rect-TFSC-CAg 模型比 P-TFSC 模型短路电流密度提升了 20.7%,比 Rect-TFSC 模型短路电流密度提升了 13.5%。说明 Ag 纳米线阵列更适用于提升矩形光栅模型的光吸收效率,可以为该模型的太阳能电池改进提供参考。

4) 从全波段非偏振光的归一化光吸收密度曲线中可以看出 CAg 纳米线阵列的光吸收增强效果略好于 RAg 纳米线阵列。

参考文献

- [1] ZHANG Shi, WANG Xiao-ping, WANG Li-jun, *et al.* Research progress in thin-film solar cells[J]. *Materials Review*, 2010, **24**(9): 126-131.
章诗,王小平,王丽军,等.薄膜太阳能电池的研究进展[J].材料导报,2010,**24**(9):126-131.
- [2] CHOWDHURY F I, NAYFEH A. Improved efficiency of thin film a-Si:H solar cells using combination of silver and gold plasmonic nanoparticles[C]. IEEE International Conference on Nanotechnology, 2016: 959-962.
- [3] WEI Shi-yuan, SUN Wei-hai, CHEN Zhi-jian, *et al.* The analysis of the efficiency of solar cells[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(16): 1748-1753.
魏世源,孙伟海,陈志坚,等.太阳能电池效率分析[J].科学通报,2016,**61**(16):1748-1753.
- [4] ZHOU Zhou, ZHOU Jian, SUN Xiao-wei, *et al.* Design of an irregularly shaped DBR for thin film solar cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 276-280.
周舟,周健,孙晓玮,等.薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计及制作[J].光学学报,2011,**31**(7):276-280.
- [5] ZHU L H, SHAO M R, MU W, *et al.* Broadband absorption and efficiency enhancement of an ultra-thin silicon solar cell with a plasmonic fractal[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(S3): A313- A323.
- [6] WANG Xiao-yan, WANG Yan, QIN Xue, *et al.* Sub-wavelength surface plasmon polariton waveguide based on ITO characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(5): 262-268.
王晓艳,王燕,秦雪,等.基于 ITO 特性的亚波长表面等离子激元波导[J].激光与光电子学进展,2016,**53**(5):262-268.
- [7] SCHULLER J A, BARNARD E S, CAI W, *et al.* Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J].

- Nature Materials*, 2010, **9**(3): 193-204.
- [8] MAGNUSSON R, WU W. Total absorption of TM polarized light in a 100 nm spectral band in a nanopatterned thin a-Si film[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2103-2105.
- [9] WANG W, WU S, REINHARDT K, *et al.* Broadband light absorption enhancement in thin-film silicon solar cells[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(6): 2012-2018.
- [10] SHEN Hong-jun, LI Ting, LU Hui-dong, *et al.* Enhancement of light absorption in thin film silicon solar cells with light trapping[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7): 816-822.
沈宏君, 李婷, 卢辉东, 等. 利用陷光结构增加硅薄膜太阳能电池的吸收效率[J]. *发光学报*, 2016, **37**(7): 816-822.
- [11] AWAL M A, AHMED Z, TALUKDER M A. An efficient plasmonic photovoltaic structure using silicon strip-loaded geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(6): 83-91.
- [12] JIA Z, CHENG Q, SONG J, *et al.* Enhanced absorptance of the assembly structure incorporating germanium nanorods and two-dimensional silicon gratings for photovoltaics[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(31): 8821-8828.
- [13] TONG Lian-ming, XU Hong-xing. Surface plasmons-mechanisms, applications and perspectives[J]. *Physics*, 2014, **41**(9): 582-588.
童廉明, 徐红星. 表面等离子激元——机理、应用与展望[J]. *物理*, 2012, **41**(9): 582-588.
- [14] ZOU Run-qiu, QIN Wen-jing, ZHANG Qiang, *et al.* Mechanism of surface plasmon enhancement in polymer solar cells with Ag nanoprisms[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(7): 788-794.
邹润秋, 秦文静, 张强, 等. 银纳米片等离子体效应增强有机太阳能电池及其性能优化研究[J]. *发光学报*, 2015, **36**(7): 788-794.
- [15] XIA Kai, LI Ying-chun, LI Xi, *et al.* Effect of different preparation conditions on the growth of PVDF nanowire[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(3): 294-298.
夏凯, 李迎春, 李曦, 等. 不同制备条件对聚偏氟乙烯纳米线生长的影响[J]. *发光学报*, 2016, **37**(3): 294-298.
- [16] XU Wen-ying. Research of metallic nano-particles based on surface plasmon and high efficiency HIT solar cells[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
许文英. 金属纳米颗粒表面等离子激元特性及异质结太阳能电池研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [17] GAO Jun, HAN Ming. Tuning surface plasmon resonance by controlling silver nanoparticle array[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, **32**(02): 222-227.
- [18] WANG Kun-xia, FENG Shi-meng, XU Hua-tian, *et al.* Relation between the multicrystalline silicon surface structure and the Pit-Trap effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 280-286.
王坤霞, 冯仕猛, 徐华天, 等. 多晶硅不同晶面陷阱坑形貌与陷光效应的关系[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 280-286.
- [19] LI Mei-cheng, HUANG Rui, BAI Fan, *et al.* A method for preparing sub-wavelength silicon nanowire arrays with anti-reflective properties. CN103030100A[P]. 2013.
李美成, 黄睿, 白帆, 等. 一种具有减反射特性的亚波长硅纳米线阵列的制备方法. CN103030100A[P]. 2013.
- [20] CHEN Ke, WU Rui, ZHENG Hong-mei, *et al.* Optical absorption of cosine grating silicon thin film solar cell[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0431002.
陈科, 吴睿, 郑红梅, 等. 余弦光栅硅薄膜太阳能电池光吸收分析[J]. *光子学报*, 2017, **46**(4): 0431002.
- [21] ZHAO Ding. Research on resonance enhancement optical properties of metal-dielectric micro-nanostructures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
赵鼎. 金属——电介质微纳结构谐振增强光学特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [22] ZHAI Y, CHEN G, XU J, *et al.* Multiple-band perfect absorbers based on the combination of Fabry-Perot resonance and the gap plasmon resonance[J]. *Optics Communications*, 2017, **399**: 28-33.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.51435003)

引用格式: CHEN Ke, FANG Xu, ZHENG Hong-mei, *et al.* Influence of Ag Nanowires on Optical Absorption of Different Grating Structures under Fixed Volume Ratio[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0705001

陈科, 方旭, 郑红梅, 等. 固定体积比例下 Ag 纳米线对不同光栅结构吸收的影响[J]. *光子学报*, 2018, **47**(7): 0705001