

# 具有频率上转换纳米球阵列的超薄晶硅太阳能电池的陷光增效研究

王晨博<sup>1</sup>, 徐朝鹏<sup>1</sup>

1.信息科学与工程学院, 燕山大学, 河北, 秦皇岛

**简介:**由于能源的消耗, 太阳能电池越来越受到人们的关注。然而, 作为商业中主要应用的晶硅太阳能电池存在表面入射光反射以及无法吸收近红外光的性质限制了晶硅太阳能电池效率的进一步提高。因此, 我们设计了一种表面具有掺氟钪化铈钠( $\alpha\text{-NaYF}_4\text{:Er}^{3+}$ )上转换纳米球阵列的超薄晶硅太阳能电池。利用COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>中波动光学模块系统的研究了具有不同尺寸和间距纳米球的晶硅太阳能电池的陷光性能。利用周期性边界条件及有限元的思想构建了电池计算单元, 在300-1150 nm 入射光范围内计算了模型的光反射及透射, 从而得出了电池的光吸收。结果表明, 在纳米球最佳直径及间距时, 表面具有微纳结构的2.33  $\mu\text{m}$ 厚活性层的晶硅太阳能电池平均光吸收效率相比于没有表面纳米结构的电池提高了8.5%。并且在增加晶硅厚度情况下电池平均光吸收依然有提高, 只是增幅减缓。具有表面微纳结构的电池在晶硅厚度增加到10  $\mu\text{m}$ 时相较于无结构电池, 平均光吸收依然有5.4%的增加。考虑到 $\alpha\text{-NaYF}_4\text{:Er}^{3+}$ 可以吸收晶硅电池无法利用的近红外光并将其转换成电池可以利用的可见光, 电池效率还会进一步提高。所设计的模型对上转换纳米材料在晶硅太阳能电池中的应用有指导意义。

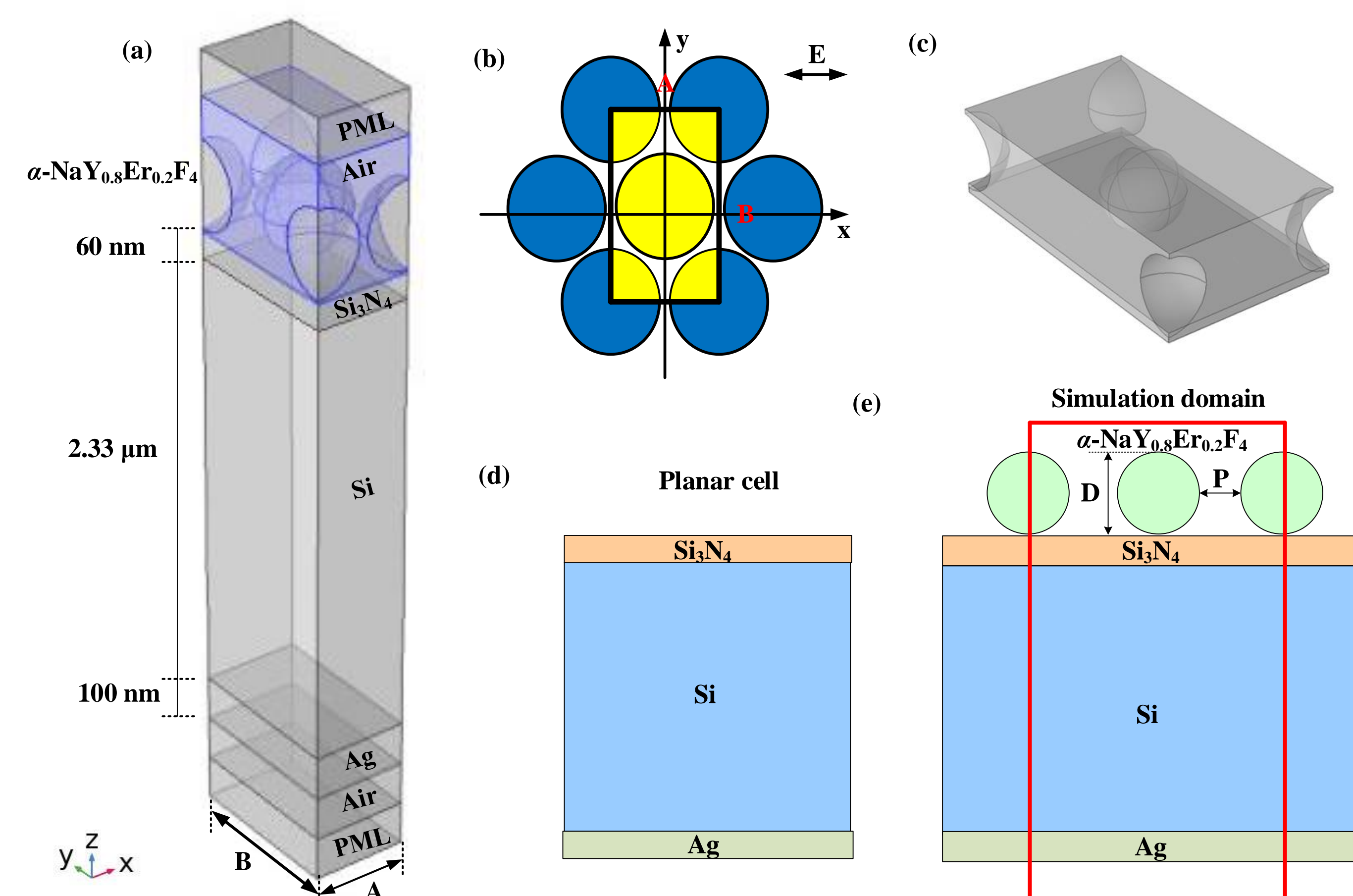


Figure 1. (a) 3D diagram of the silicon solar cells (SCs) with 60 nm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and hexagonally packed  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  nanospheres (NSs) on the surface; (b) and (c) top view and oblique view of the periodic arrays of  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  NSs. The black rectangle of dimension indicates the lattice constant; (d) Schematic of planar SCs with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  layer on the surface and Ag layer on the bottom (e) Schematic of planar SCs with  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  NSs arrays on the surface.

**计算方法:**利用COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>中波动光学模块系统的研究了具有不同尺寸和间距纳米球的晶硅太阳能电池的陷光性能。

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

利用周期性边界条件及有限元的思想构建了电池计算单元, 在300-1150 nm 入射光范围内计算了模型的光反射及透射, 从而得出了电池的光吸收。

$$A(\lambda) = \frac{1}{2} [A_{\text{TE}}(\lambda) + A_{\text{TM}}(\lambda)]$$

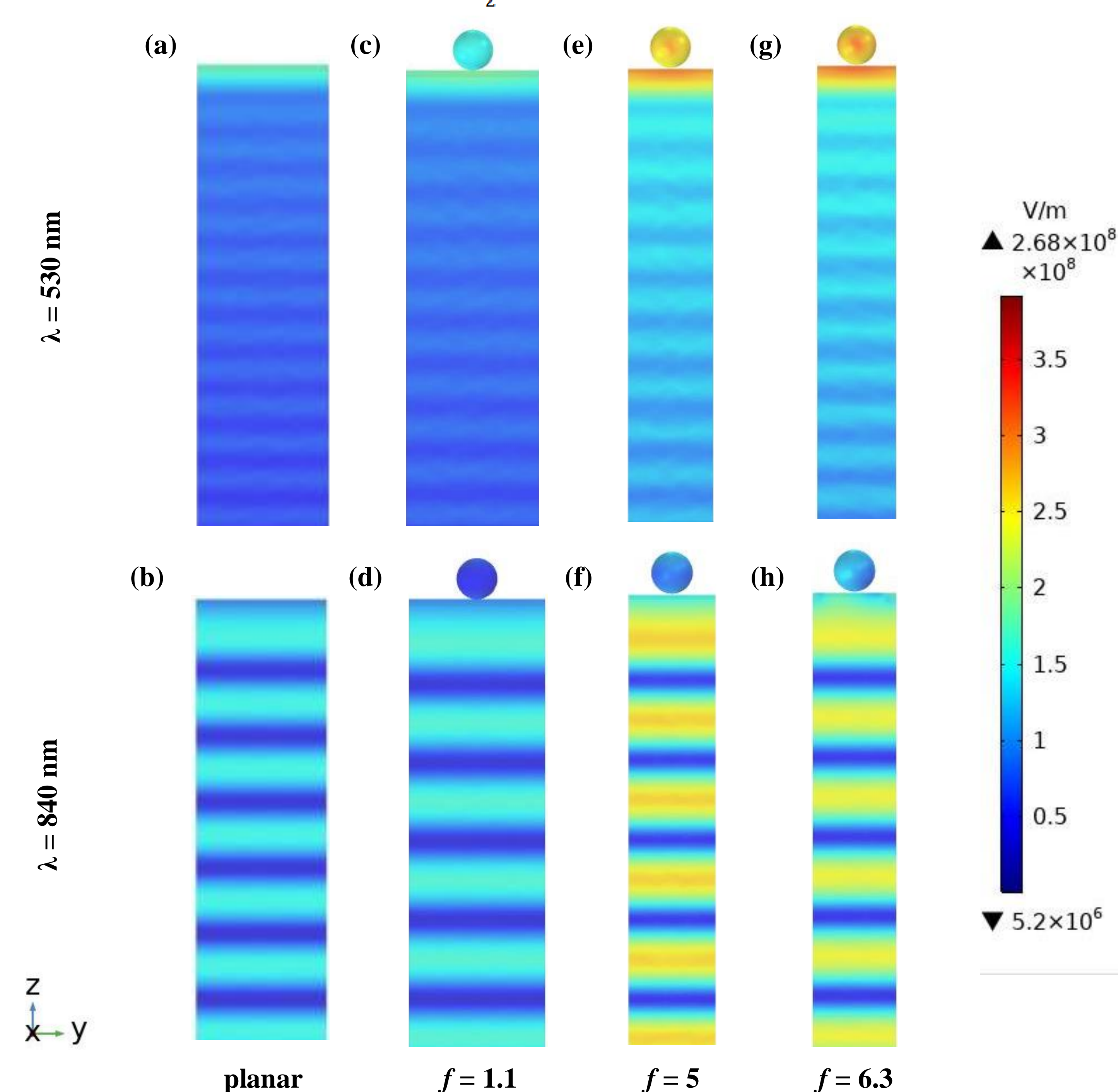


Figure 2. The contours of the two-dimensional electric field intensity at 530 nm and 840 nm (a), (b) Electric field intensity of planar SCs, (c) to (g) Electric field intensity of SCs with  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  NSs on the surface in ratio  $f = 1.1, f = 5$  and  $f = 6.3$ .

**结果:**为了研究表面纳米结构对太阳能电池的影响, 表面具有不同尺寸 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 上转换纳米球阵列的平面太阳能电池的陷光性能被系统的模拟了。为了得到不同的 $f$ , 将纳米球的直径固定, 纳米球的间距由大到小进行改变。图2为平面硅太阳能电池与具有 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球结构的太阳能电池电场图对比。从图2(a)可以看出, 大部分入射光不能被硅吸收, 硅层电场的分布是由于法布里-珀罗(FP)干涉造成的。图2(c)-(h)表面具有纳米球阵列的太阳能电池电场图, 从中我们可以发现入射光在图2(c)-(h)中比平面太阳能电池传输的更好。与 $f = 1.1$ 和 $f = 6.3$ 中表面修饰有纳米球的太阳能电池相比,  $f = 5$ 中的太阳能电池内部电场分布更强, 从而导致了更高的光吸收。太阳能电池的平均光吸收与 $f$ 变化之间的关系如图3所示。仿真中使用的其他所有参数见图Fig. 1 (a)。图3为 $f$ 变化对太阳能电池平均光吸收的影响。表面有 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球修饰的晶硅太阳能电池性能在相同的硅厚情况下度显然优于平面硅太阳能电池。从图3可以看出, 当比值从1到8变化时, 太阳能电池的平均光吸收先增加, 达到最大值后平均光吸收下降。具有较大直径纳米球的太阳能电池表现出更高的平均光吸收。平均光吸收和短路电流密度最高的是太阳能电池是在纳米球直径80 nm,  $f$ 的为4.6, 分别达到62.22%和27.23  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 。图4为在纳米球直径和 $f$ 变化的情况下太阳能电池平均光吸收的等值线图。图5为表面具有直径60 nm  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球的太阳能电池与平面太阳能电池在改变基底硅厚度的情况下平均光吸收变化情况。从图4中可以看出, 随硅厚度的增加, 两种太阳能电池的平均光学吸收仍然增加, 在10 $\mu\text{m}$ 硅厚度时分别达到81.83%和79.03%, 显示出所设计的结构对较厚硅仍有影响。考虑到频率转换材料 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 的上转换性能, 这个结果会高得多。

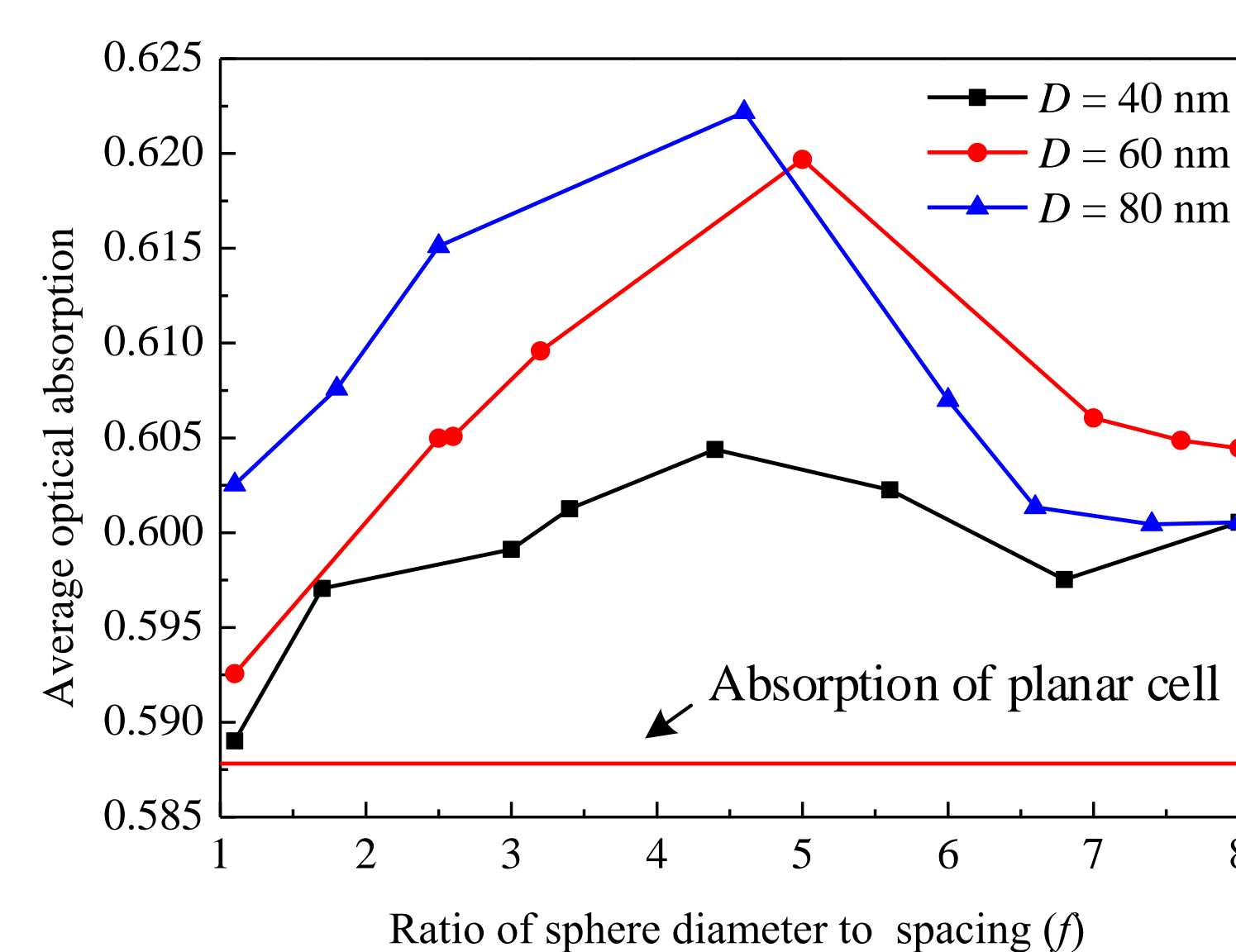


Figure 3. Relationship between average optical absorption and the ratio of diameter to pitch.

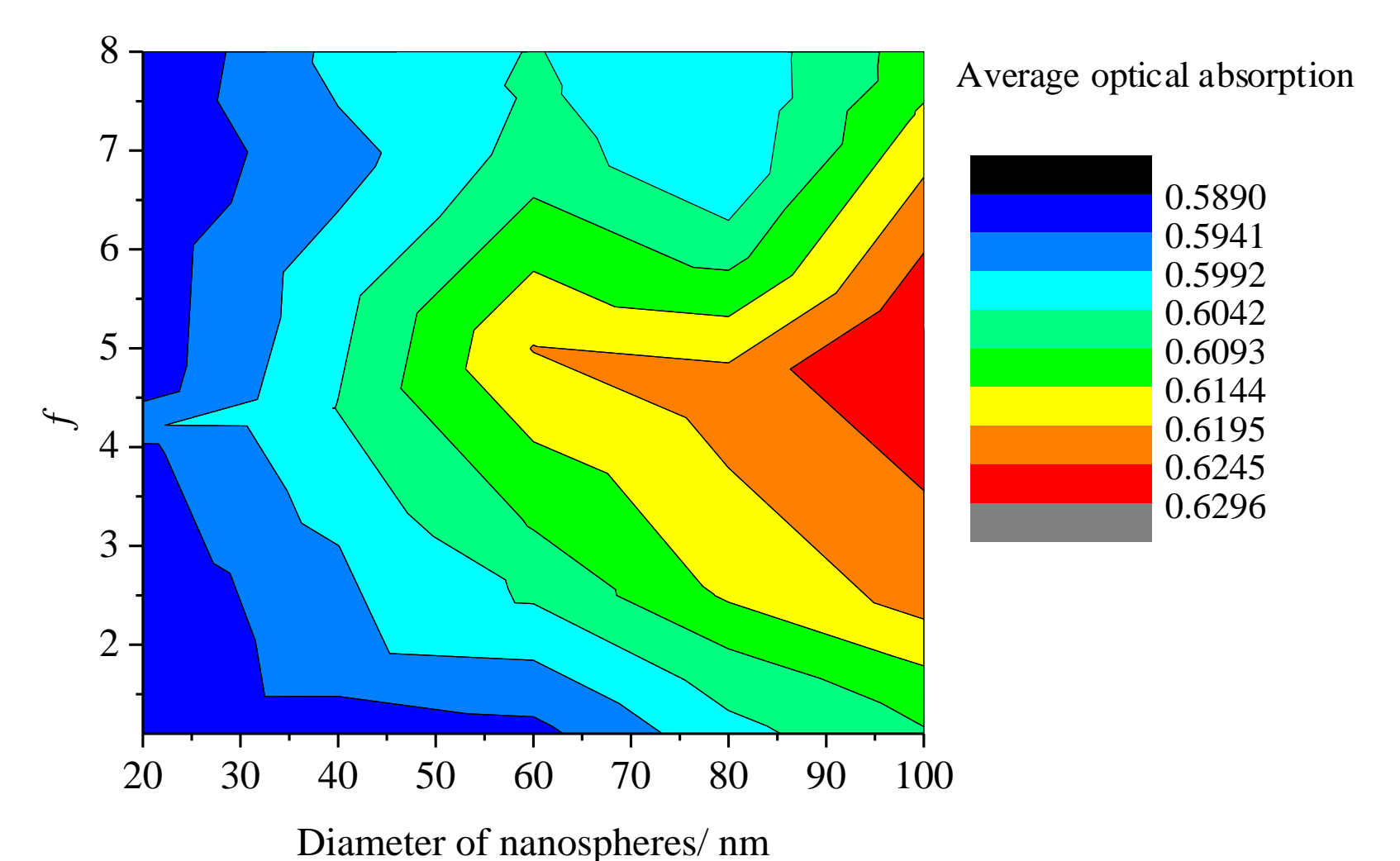


Figure 4. Contour map of average optical absorption when  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  NSs diameter changes from 20 nm to 100 nm and ratio changes from 1 to 8

Table 1. The average optical absorption and  $J_{sc}$  enhancement in different type of silicon-based SCs

硅厚度/ $\mu\text{m}$	平均光吸收/%		
	结构化	平面	增幅
2.33	61.97	58.78	5.42
3	64.41	61.91	4.04
4	68.02	65.85	3.29
7	74.88	72.77	2.91
10	81.13	79.03	2.65

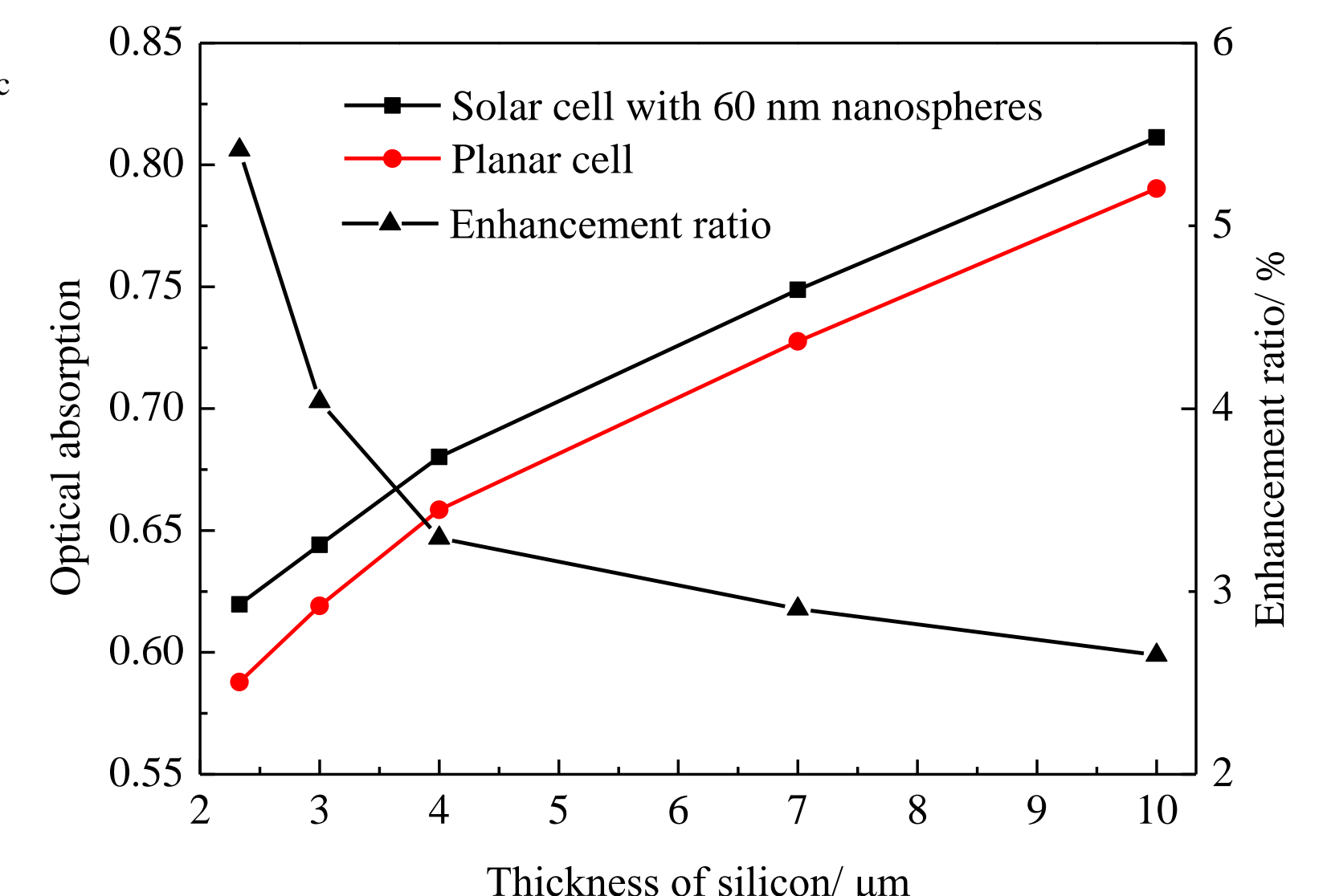


Figure 5. Average absorption enhancement of different thickness (2330 nm, 3000 nm, 4000 nm, 7000 nm and 10000 nm) of silicon SCs with and without 60 nm  $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$  NSs on the surface.

**结论:**我们在超薄硅太阳能电池表面上的 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球阵列进行了数值模拟。研究表明, 表面密集排列有 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球的太阳能电池比平面硅太阳能电池有更好的光吸收性能。太阳能电池最高平均光学吸收是 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球在100纳米直径, 5.2直径间距时得到的。2.33 $\mu\text{m}$ 厚硅衬底太阳能电池可以实现短路电流密度27.32  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 最大光吸收的62.96%。在300至1150纳米的波长范围内, 与厚度相同的平面太阳能电池相比, 吸收增强了8.5%。考虑到频率转换材料 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 的上转换性能, 这个结果会高得多。我们的工作可以指导设计和制造 $\alpha\text{-NaEr}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{F}_4$ 纳米球阵列以增强光晶体硅太阳能电池的光管理。下一步将在氟化铈钠材料的频率上转换方面做进一步的研究工作, 以提高太阳能电池的性能。

## 参考文献:

- Grandidier J, Callahan D M, Munday J N, et al. Light Absorption Enhancement in Thin-Film Solar Cells Using Whispering Gallery Modes in Dielectric Nanospheres. *Advanced Materials*, 23(10):1272-1276 (2011).
- Brongersma M L, Cui Y, Fan S. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures. *Nature Materials*, 13(5):451-60 (2014).
- Ferry V E, Munday J N, Atwater H A. Design Considerations for Plasmonic Photovoltaics. *Advanced Materials*, 22(43):4794-4808 (2010).
- Xu Z, Huangfu H, Li X, et al. Role of nanocone and nanohemisphere arrays in improving light trapping of thin film solar cells. *Optics Communications*, 377:104-109 (2016).