

基于倒锥光子晶体结构的高效频率上转换太阳能电池设计

王晨博¹, 徐朝鹏¹

1.信息科学与工程学院, 燕山大学, 秦皇岛, 河北, 中国

简介:

太阳能电池直接将光能转化为电力, 为满足日益增长的全球能源需求提供了一个切实可行且可持续的解决方案。传统光伏器件受其自身材料特性、表面反射等因素的限制, 转换效率无法得到进一步提升。因此, 我们设计了一种具有六方相钇铒共掺氟化钇钠(β -NaYF₄:Er/Yb)上转换层及纳米圆锥陷光阵列的超薄晶体硅太阳能电池。

计算方法:

利用COMSOL Multiphysics[®]中波动光学模块系统的研究了具有不同尺寸和间距纳米圆锥的晶硅太阳能电池的陷光性能。

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

利用Fluent周期性边界条件构建了电池计算单元, 模型的上下表面包裹了空气层及完美匹配层。入射光谱为AM1.5模拟太阳光谱, 在300-1150 nm 波长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。

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad \text{公式 (2)}$$

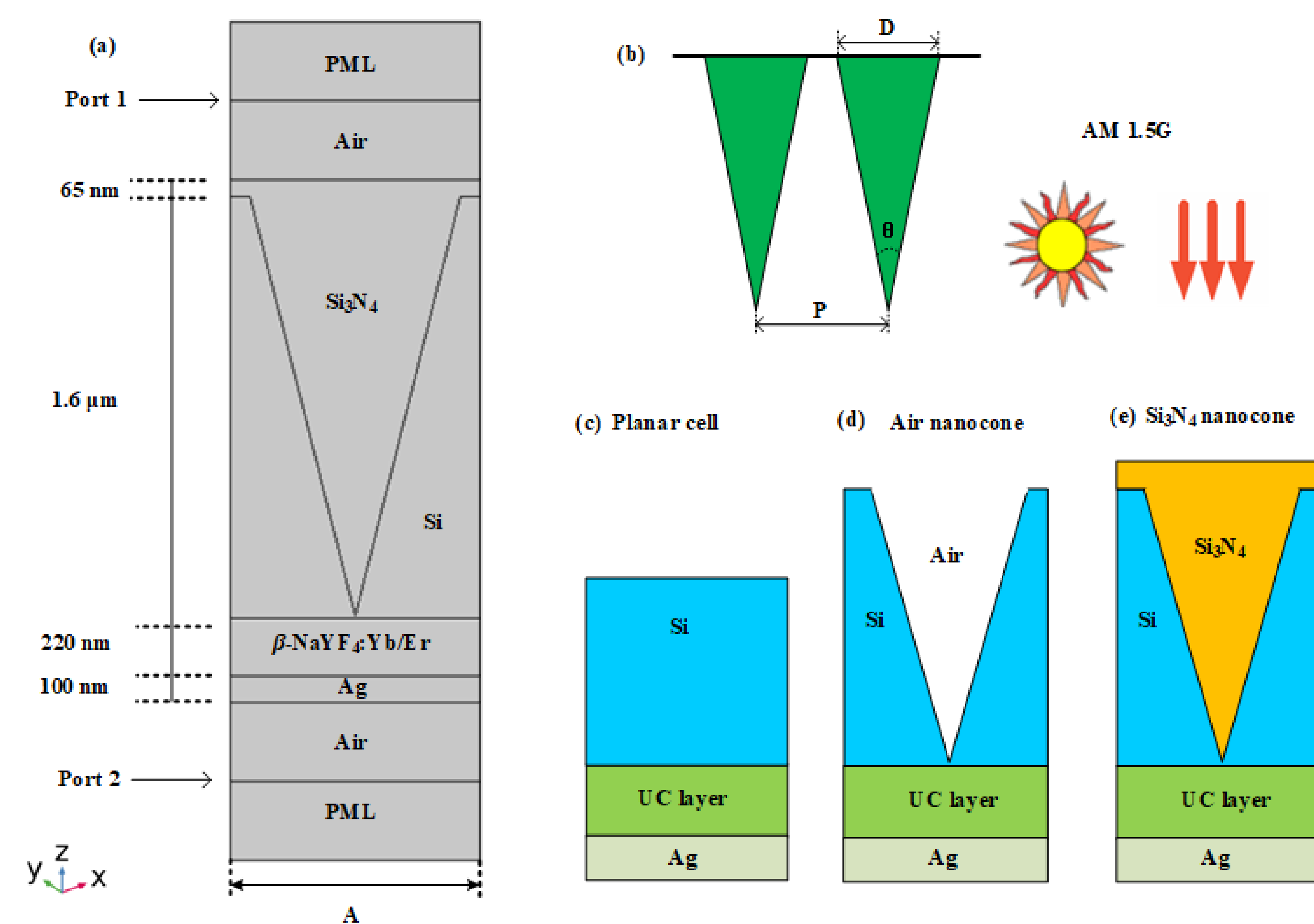


图1. (a) 表面具有65 nm厚Si₃N₄层、内嵌光子晶体纳米圆锥的晶硅太阳能电池计算单元模型; (b) 周期性排列的光子晶体纳米圆锥结构的示意图; (c) 将 β -NaYF₄:Er/Yb上转换层夹在活性层和Ag层之间的平面晶硅太阳能电池原理图; (d) 活性层内嵌入光子晶体空气纳米圆锥的平面硅太阳能电池原理图; (e) 表面具有Si₃N₄层, 内嵌光子晶体Si₃N₄纳米圆锥的平面硅太阳能电池原理图

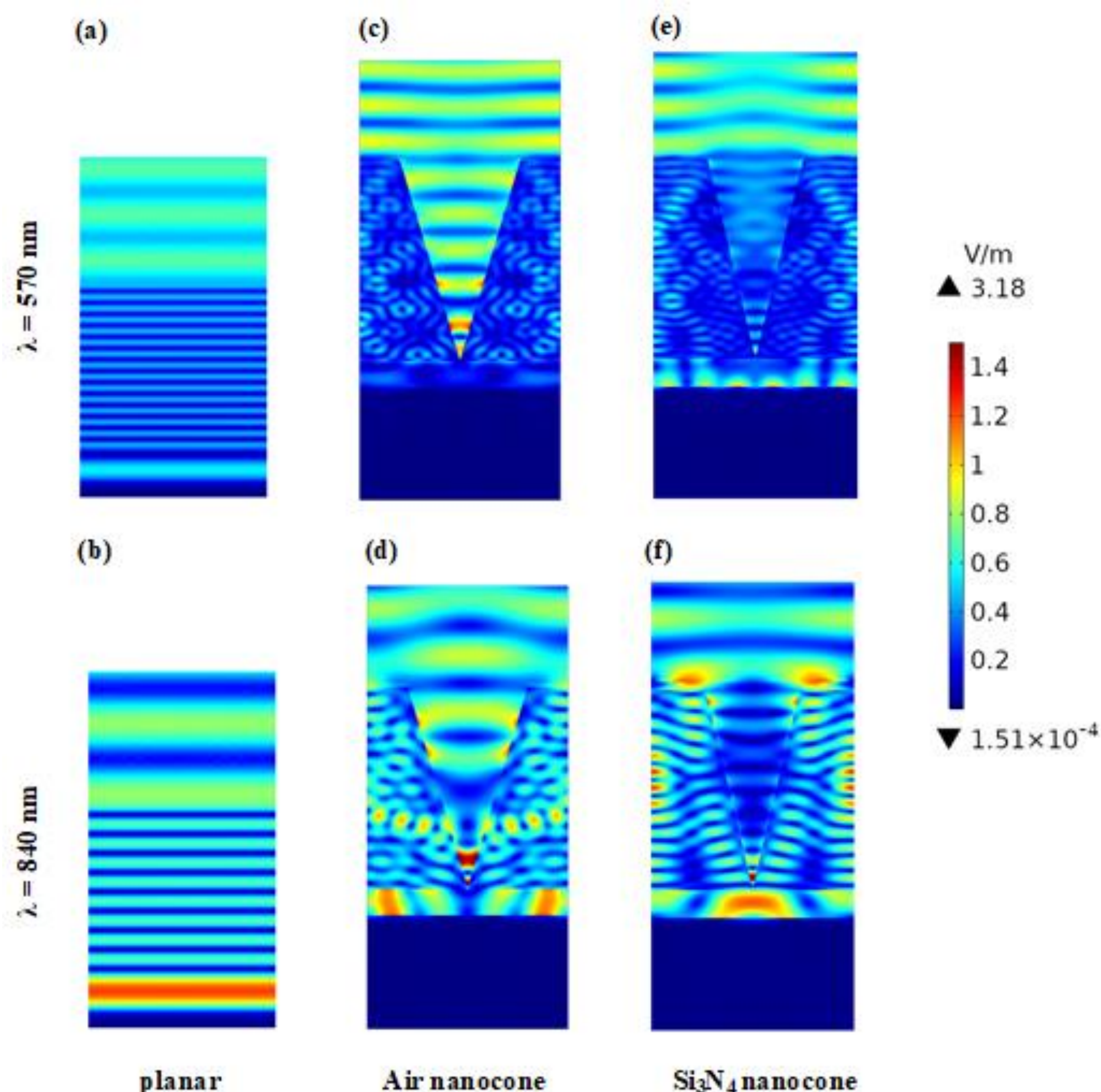


图2. 入射光波长在570 nm和840 nm时电池的二维电场强度图 (a), (b) 平面硅太阳能电池的电场强度图; (c), (d) 晶硅活性层内部嵌有光子晶体空气纳米圆锥的电池电场强度图; (e), (f) 表面有Si₃N₄抗反射层, 活性层内嵌有光子晶体Si₃N₄纳米圆锥的电池电场强度图

结果和讨论:

为了研究内嵌于晶硅活性层中光子晶体纳米圆锥结构改变对太阳能电池性能的影响, 模拟了空气及氮化硅纳米圆锥的直径 D 与间距 P 改变对晶硅电池平均光吸收的影响。当纳米圆锥的直径 D 固定时, 改变纳米圆锥之间的间距 P , 从而获得了不同尺寸的计算晶格常数 $A = D + P$ 。由频率上转换材料 β -NaYF₄:Er/Yb构成的上转换层位于晶硅活性层和Ag背反射层之间, 仿真中使用的模型及电池其他参量设置见图1。图2为570 nm和840 nm太阳光入射时, 平面硅太阳能电池与具有光子晶体纳米圆锥结构的太阳能电池电场强度图对比。从图2(a)和(b)可以看出, 大部分入射光不能被电池充分吸收, 晶硅活性层电场的分层分布是由于法布里-珀罗(F-P)干涉造成的。图2(c)-(f)为晶硅内部嵌有纳米圆锥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)-(f)中比平面太阳能电池传输的更好。与内部具有填充了Si₃N₄纳米圆锥的晶硅电池相比, 内嵌空气纳米圆锥太阳能电池的内部电场分布更强, 从而导致了更高的光吸收。

图3和图4为太阳能电池的平均光吸收随纳米圆锥直径 D 与晶格常数 A 的改变而改变的等值线图。从图3和4可以看出, 电池处于最佳平均光吸收的范围为空气纳米圆锥直径 D : 600-700 nm, 晶格常数 A : 1050-1150 nm, 氮化硅纳米圆锥直径 D : 400-500 nm, 晶格常数 A : 1000-1100 nm区域, 电池的最高平均光吸收分别达到86.06%和78.31%。图5为平面电池与内嵌光子晶体纳米圆锥结构的晶硅太阳能电池 J - V 曲线对比图。从图5可以看出内嵌光子晶体纳米圆锥的晶硅电池的电密度明显高于平面电池。表1为不同结构太阳能电池的光电性能技术指标对比。通过对比可以发现, 具有纳米圆锥结构太阳能电池的光电性能较平面硅电池都有了较大提高, 所设计的结构可以较好的提升电池的效率。考虑到 β -NaYF₄:Er/Yb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。

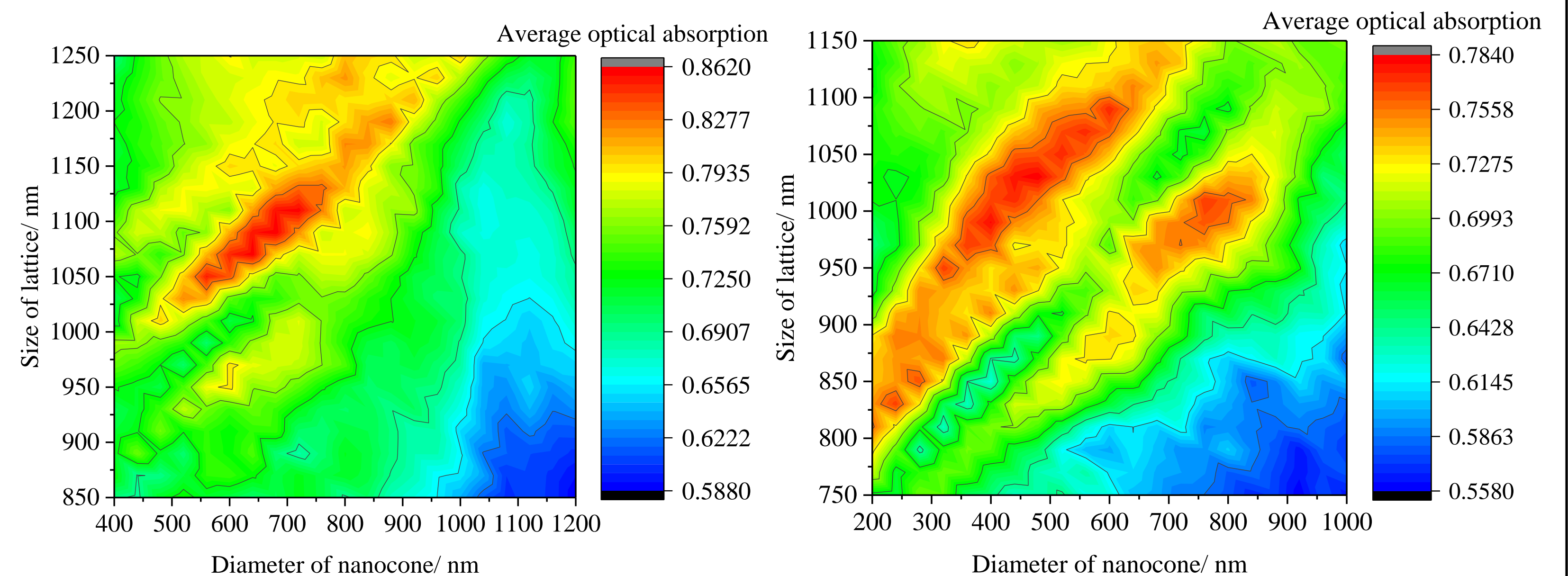


图3. 光子晶体空气纳米圆锥直径400- 1200 nm, 计算晶格尺寸850- 1250 nm范围内改变对电池平均光吸收影响的等值线图

图4. 光子晶体Si₃N₄纳米圆锥半径200- 1000 nm, 计算晶格尺寸750- 1150 nm范围内改变对电池平均光吸收影响的等值线图

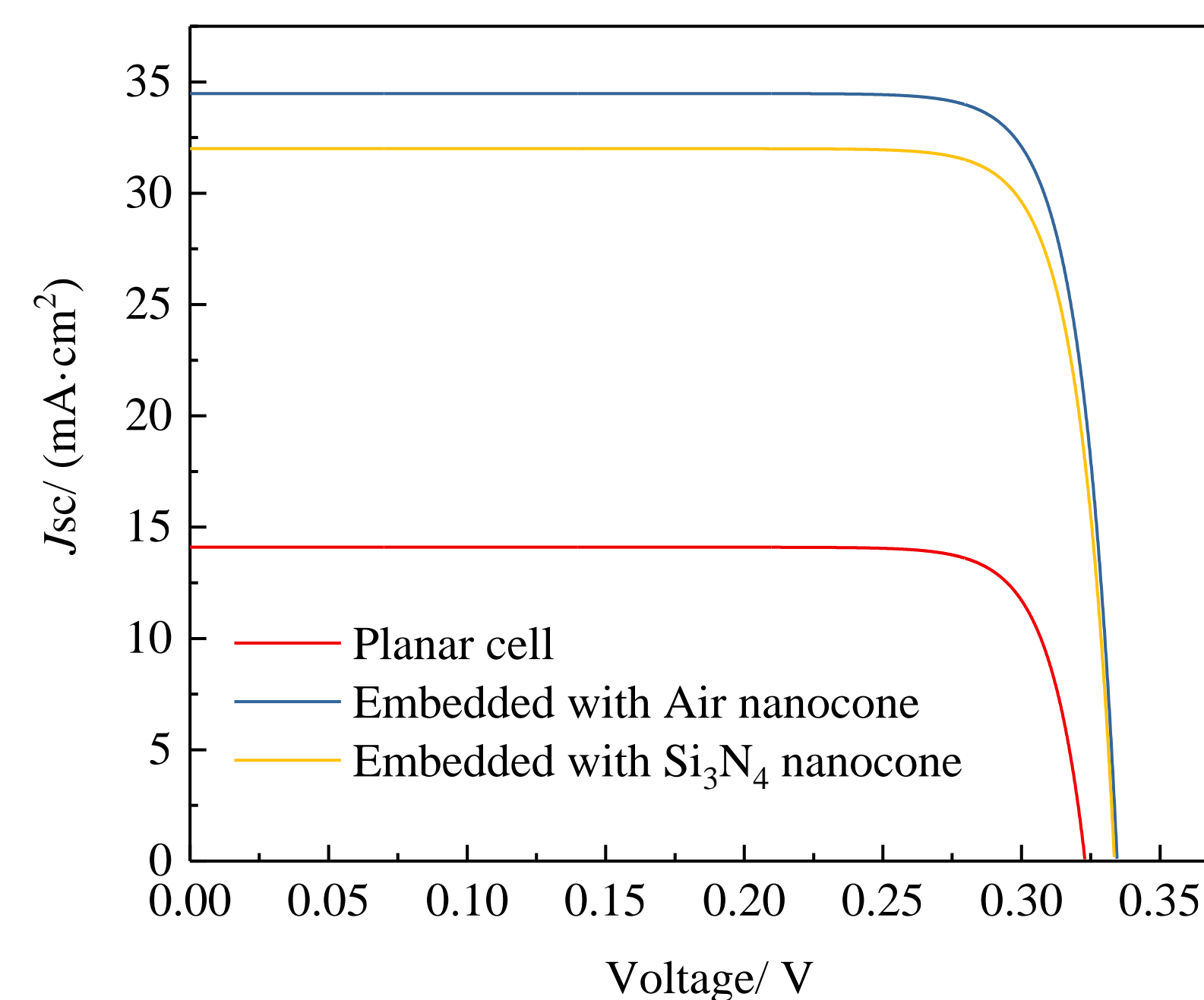


图5. 平面电池与内嵌光子晶体纳米圆锥结构的晶硅太阳能电池 J - V 曲线对比图

表1. 不同结构太阳能电池的光电性能技术指标对比

技术指标	平面硅电池	内嵌空气纳米圆锥	内嵌氮化硅纳米圆锥
平均光吸收 (%)	35.09	86.06	78.31
短路电流密度(mA·cm ⁻²)	14.10	34.48	32.00
开路电压(V)	0.32	0.34	0.33
填充因子(%)	73.50	74.11	74.06
光电转换效率(%)	16.68	40.79	37.86

参考文献:

- Le K Q, John S. Synergistic plasmonic and photonic crystal light-trapping: Architectures for optical up-conversion in thin-film solar cells[J]. Optics Express, 2014, 22 Suppl 1(S1):A1.
- Brongersma M L, Cui Y, Fan S. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures[J]. Nature Materials, 13(5):451-60 (2014).
- Chenbo Wang, Shuai Zhao, Fei Bian, Daxue Du, Chunsheng Wang, Zhaopeng Xu. Absorption enhancement of ultrathin crystalline silicon solar cell with frequency upconversion nanosphere arrays[J]. Communications in Theoretical Physics. 2020, 72(1): 015501