

Рис. 1. Модель наноспутника стандарта «CubeSat»

Таким образом, мы получаем модель наноспутника стандарта «CubeSat» пригодную для моделирования поведения данного спутника на орбите.

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В. И. Шевцова

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергия является одним из наиболее перспективных альтернативных источников энергии. Для того чтобы солнечная фотоэнергетика могла конкурировать с традиционными источниками энергии (ископаемое топливо, атомная энергетика и др.), необходимо снизить стоимость солнечных элементов (СЭ) как минимум в 2 раза [1]. В настоящее время большая часть производимых СЭ основана на использо-

вании монокристаллического кремния толщиной порядка 180–350 мкм. При этом практически 40 % стоимости фотоячейки составляет стоимость кремния. В связи с этим большое внимание уделяется разработке тонкопленочных СЭ, в которых полупроводник имеет толщину 1–2 мкм и расположен на подложке из более дешевого материала – стекла, пластика или нержавеющей стали.

Повышение КПД СЭ при одновременном уменьшении его физической толщины может быть достигнуто внедрением дополнительных центров, обеспечивающих селективное поглощение и рассеяние света. Данному критерию соответствуют оптические свойства наночастиц благородных металлов.

В настоящей работе рассматривается теоретическая модель СЭ со встроенными наночастицами золота и серебра.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО СЛОЯ СО ВСТРОЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

Для расчета поглощающих свойств кремниевого слоя со встроенными наночастицами металла применялся метод конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием компьютерной программы Lumerical FDTD Solutions [2]. Исследуемая структура, полубесконечный кремниевый слой с расположенным на поверхности либо внутри массивом наночастиц металла, была задана периодическими граничными условиями. В качестве диэлектрических функций Si, Ag и Au использовались экспериментальные данные [3].

Исследуемые характеристики, полученные с мониторов мощности, рассчитывались следующим образом. В качестве *квантовой эффективности* использовалось выражение:

$$QE = \frac{P_{abs}}{P_{in}},$$

где P_{abs} и P_{in} – мощности падающего и поглощенного структурой света соответственно. При этом *интегральная квантовая эффективность* определялась формулой:

$$IQE = \frac{\int \frac{\lambda}{hc} QE(\lambda) I_{AM1,5}(\lambda) d\lambda}{\int \frac{\lambda}{hc} I_{AM1,5}(\lambda) d\lambda},$$

где $I_{AM1,5}$ – спектральная плотность освещенности солнечного света.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Металлические наночастицы на поверхности СЭ могут быть использованы в качестве *дополнительных рассеивающих центров*. В однородной среде наночастицы металла рассеивают свет практически симметрично в прямом и обратном направлениях. При помещении частицы вблизи границы двух диэлектриков свет будет рассеиваться преимущественно в диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью, в данном случае – кремний. Эффективными рассеивающими центрами могут быть частицы с радиусами более 35 нм и 60 нм для серебра и золота соответственно. Использование малых частиц не рассматривается, так как для них коэффициент поглощения преобладает над коэффициентом рассеяния. При этом, неограниченное увеличение в размерах также невозможно, так как происходит уменьшение доли рассеянного света, попадающей в диэлектрик [4].

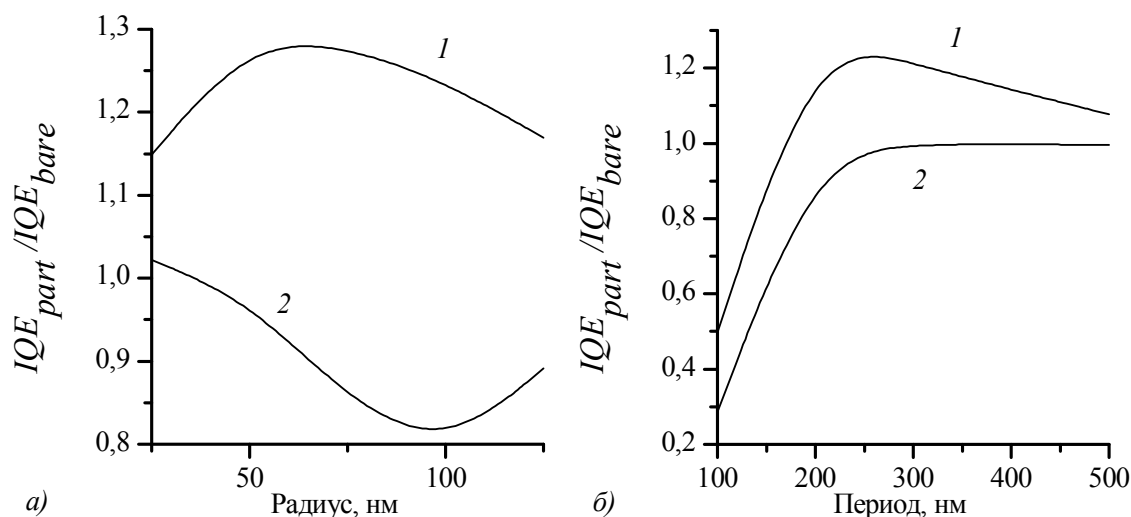


Рис. 1. Отношение интегральной квантовой эффективности слоя с наночастицами (IQE_{part}) к таковой без наночастиц (IQE_{bare}): для серебряных (1) и золотых (2) наночастиц различных радиусов, период структуры равен $P=4R$ (а), и при различном периоде структуры, радиус частиц 50 нм (б)

Результаты численного моделирования (рис. 1 а) показывают, что при радиусе частиц 50 нм и 25 нм для серебра и золота соответственно достигается максимальное усиление поглощающей способности. Для наночастиц золота, несмотря на некоторое усиление при радиусе частиц 25 нм, в целом наблюдается значительное уменьшение квантовой эффективности, что может быть связано с высоким коэффициентом поглощения наночастиц золота в коротковолновом диапазоне. Существенным образом на поглощающую способность слоя влияет период решетки наночастиц (рис. 1 б). Наименьшее поглощения наблюдается при соприкасающихся частицах, что может объясняться концентрацией элек-

ромагнитного поля между наночастицами. В данном случае излучение своеобразным образом задерживается наночастицами на поверхности, не позволяя ему проникнуть в слой диэлектрика.

Металлические наночастицы могут также помещаться непосредственно в кремниевый слой. В такой конфигурации наночастицы служат *дополнительными поглощающими центрами*. При этом, усиление локального поля вокруг металлических наночастиц приводит к увеличению поглощения в прилегающих слоях полупроводникового материала.

Как показывают результаты численного моделирования (рис. 2), инкорпорированные наночастицы металла могут способствовать повышению поглощающей способности слоя вплоть до 120 %. При этом часть энергии может теряться при поглощении света непосредственно наночастицами металла без дальнейшей передачи в диэлектрическое окружение, данный эффект в рассматриваемой модели не учитывается. В отличие от случая, где наночастицы помещаются на поверхность кремниевой подложки, усиление поглощения в длинноволновой области происходит без значительных потерь в коротковолновом диапазоне. Как для наночастиц золота, так и для наночастиц серебра наибольшее усиление наблюдается при радиусе частиц 50 нм (рис. 2 а), тогда как дальнейшее увеличение размера приводит к уменьшению квантовой эффективности слоя. Необходимо также отметить, что наибольшее поглощение в структуре наблюдается при соприкасающихся частицах, что может объясняться эффективным захватом электромагнитного излучения и его концентрацией вблизи поверхности частиц.

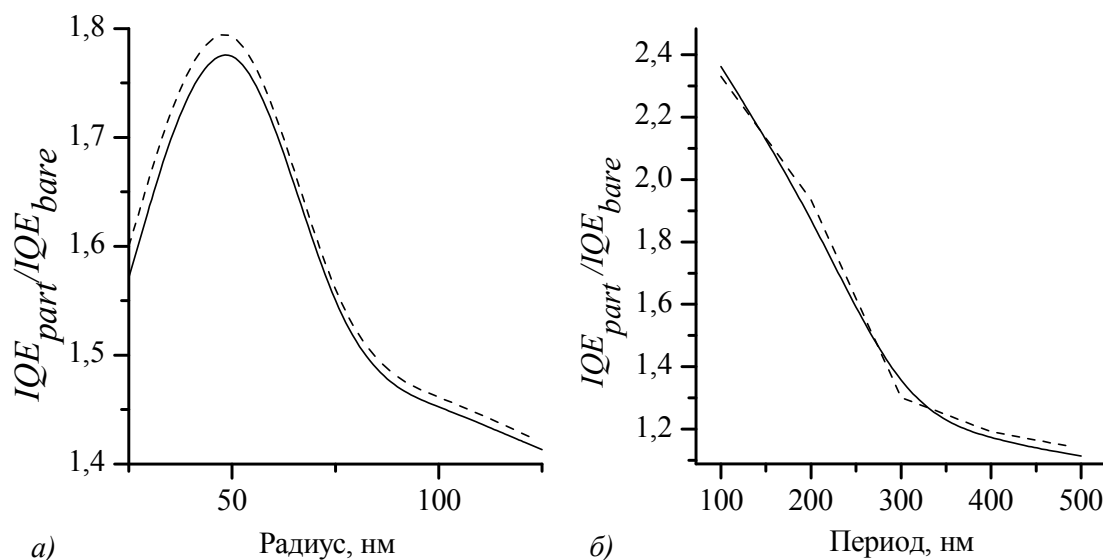


Рис. 2. Отношение интегральной квантовой эффективности слоя с наночастицами (IQE_{part}) к таковой без наночастиц (IQE_{bare}): для серебряных (штрих. линия) и золотых (сплошная линия) наночастиц различных радиусов, период структуры равен $P=4R$ (а) и при различном периоде структуры, радиус частиц 50 нм (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено численное моделирование кремниевого слоя с расположенными на поверхности (рассеивающие центры) либо внутри (поглощающие центры) наночастицами золота и серебра. Показано, что использование массива наночастиц серебра в качестве рассеивающих центров способно повысить квантовую эффективность слоя до 25 %. При этом, для наночастиц золота такого эффекта не обнаружено. Использование как наночастиц золота, так и наночастиц серебра в качестве поглощающих центров показывает увеличение квантовой эффективности слоя вплоть до 120 % (без учета потерь при поглощении света непосредственно наночастицами).

Литература

1. *Swanson. R. M.* Proc. 19th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf., Paris, France, 2004.
2. *Интернет-адрес:* <http://www.lumerical.com/>.
3. *Palik E. D.* Handbook of Optical Constants of Solids. Academic. New York, 1985. P. 353, 555.
4. *Catchpole K. R., Polman A.* Plasmonic solar cells // Optics Express 16. № 26. 2008. P. 21793–21800.