

УДК 535.345.6, 535.417, 666.1.056.

ВЛИЯНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ПЛАЗМОННЫХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ НА ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА ОДНОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР

К.В. Барышникова^a, М.И. Петров^{a,b}, В.Е. Бабичева^{a,c}, А.В. Чебыкин^a, П.А. Белов^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Академический Университет, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^c Центр нанооптики Университета штата Джорджия, Атланта, GA 30302, США

Адрес для переписки: k.baryshnikova@phoi.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.06.15, принята к печати 27.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-767-774

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Барышникова К.В., Петров М.И., Бабичева В.Е., Чебыкин А.В., Белов П.А. Влияние включения плазмонных и диэлектрических наночастиц на просветляющие свойства однородных покрытий фотовольтаических кремниевых структур // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 767–774.

Аннотация

Предмет исследования. Проведен теоретический анализ эффективности просветляющих покрытий на основе плазмонных серебряных (Ag) и диэлектрических кремниевых (Si) наночастиц для фотовольтаических кремниевых структур. Резонансные свойства таких частиц в оптическом диапазоне обуславливают увеличение эффективности поглощения света в активном слое кремниевых элементов. Особенностью рассматриваемой структуры является сочетание в одном композиционном слое функции электрического контакта и просветляющего покрытия. **Метод.** Расчеты выполнены в пакете CST Microwave Studio с использованием метода конечных разностей в частотном режиме (FDFD). Оптические параметры материалов задавались согласно экспериментально измеренным данным. В расчете варьировались геометрические параметры композитного слоя: размеры и расположение частиц. Выполнено сравнение эффективности поглощения света с применением различных вариантов покрытия: оксид индия-олова (ITO), ITO со сферическими наночастицами, расположенными на поверхности ITO, ITO со сферическими наночастицами, расположенными на поверхности активного слоя. Исследованы разреженные решетки частиц с радиусами от 15 до 80 нм. Частицы таких размеров обладают преимущественно дипольными резонансными откликами. **Основные результаты.** Расчетным путем показано, что внедрение наночастиц в покрытие приводит к существенному искажению спектра поглощения в диапазоне длин волн 300–800 нм и появлению на нем резонансных особенностей. Последнее связывается нами с резонансными свойствами наночастиц. Показано, что резонансный отклик частиц, располагающихся на поверхности ITO, сходен с откликом свободных частиц. При этом на резонансных частотах происходит резкое уменьшение поглощения света в активном слое. Резонансный отклик наночастиц, расположенных в объеме слоя ITO, значительно отличается от отклика свободных частиц: уменьшается резонансная частота, снижается добротность. Показано, что при увеличении размера Ag- и Si-наночастиц, располагающихся на поверхности ITO, происходит уменьшение интегрального поглощения до 25%. Для Ag-частиц, располагающихся в объеме ITO, характерно монотонное уменьшение интегрального поглощения до 30% при уменьшении их размера. Максимальное влияние на интегральный показатель поглощения оказывают Si-частицы размером 50 нм. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть полезны для понимания физики работы просветляющих композиционных покрытий с включением наночастиц и использованы разработчиками солнечных кремниевых элементов.

Ключевые слова

фотовольтаика, просветление, наночастицы, плазмон, Ми-резонанс.

THE INFLUENCE OF PLASMONIC AND DIELECTRIC INCLUSIONS ON ANTIREFLECTIVE PROPERTIES OF HOMOGENEOUS COATINGS FOR SILICON PHOTOVOLTAIC STRUCTURES

K.V. Baryshnikova^a, M.I. Petrov^{a,b}, V.E. Babicheva^{a,c}, A.V. Chebykin^a, P.A. Belov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Academic University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^c Center for Nano-Optics of the Georgia State University, Atlanta, GA 30302, USA

Corresponding author: k.baryshnikova@phoi.ifmo.ru

Article info

Received 10.06.15, accepted 27.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-767-774

Article in Russian

For citation: Baryshnikova K.V., Petrov M.I., Babicheva V.E., Chebykin A.V., Belov P.A. The influence of plasmonic and dielectric inclusions on antireflective properties of homogeneous coatings for silicon photovoltaic structures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 767–774.

Abstract

Subject of Study. Theoretical analysis of the efficiency for the antireflective coatings based on plasmonic silver (Ag) and dielectric silicon (Si) nanoparticles is presented. We observe the increase of light absorption in the active layer, which is related to the optical resonant properties of considered nanoparticles. Characteristic property of the studied composite layer is its ability to combine the functions of electric contacts and anti-reflective coating. **Method.** Numerical calculations were performed in CST Microwave Studio with FDFD method (Finite Difference in Frequency Domain). The optical parameters of materials were extracted from the experimentally measured data available in literature. Geometrical parameters of composite layer – size and location of particles – were varied. Comparison of light absorption efficiency for different coatings on top of the active layer is presented: the homogeneous Indium Tin Oxide (ITO) layer, ITO layer with the spherical nanoparticle inclusions on the ITO surface, ITO layer with spherical nanoparticle bulk inclusions. Periodical lattices of particles with sizes of range between 15 and 80 nm were considered. Nanoparticles of this size have dominant dipole response. **Main Results.** Numerical calculations have shown that nanoparticle inclusions cause significant deformation of the absorption spectra with appearing of resonant peculiarities in the wavelength range equal to 300-800 nm. It originates from the nanoparticle resonant features, which are similar to the resonant features of isolated nanoparticles. Absorption in the active layer decreases sharply at the resonant wavelength. Resonant response of nanoparticles placed on the ITO surface differs significantly from the isolated ones: the resonant frequency and Q-factor decrease. It was shown that absorption in the active layer decreases by 25 % when the size of Ag and Si particles increases. Ag nanoparticles, placed in ITO layer on top of the active layer, show a monotonic decrease of integral absorption down to 30% with decreasing of nanoparticle size. Si nanoparticles of 50 nm radius have maximal influence on the absorption. **Practical Significance.** These results may be useful for understanding the physics of antireflective composite coatings with inclusions of nanoparticles for developers of silicon solar cells.

Keywords

photovoltaics, antireflection, nanoparticles, plasmon, Mie-resonance.

Введение

Однородные интерференционные просветляющие покрытия успешно используются во многих областях промышленности. В настоящее время технологии позволяют получить покрытия на стекле, дающие пропускание, близкое к 100% [1]. Стекла с такими покрытиями применяются в первую очередь для различных оптических приборов (телескопы, микроскопы, фотоаппараты), а также находят свое применение в самом широком спектре строительных, автомобильных и других технологий. За счет подбора оптимальных оптических и геометрических параметров покрытия можно добиться полного гашения отражения на определенной длине волны (так называемый эффект четвертьволновой пластинки). Просветление в остальном диапазоне длин волн может существенно снижаться в случае сильного различия показателей преломления покрытия и просветляемой среды.

Таким образом, существует целый ряд задач, в первую очередь связанных с фотовольтаикой, где необходимо получать просветление поглощающих материалов с высоким показателем преломления и где однородные покрытия оказываются неэффективны в диапазоне длин волн вдали от частоты просветления. Здесь стоит заметить, что термин «просветление» обычно означает усиление прохождения света в прозрачную среду. В фотовольтаических системах применяются сильно поглощающие свет материалы, поэтому корректнее говорить об «антиотражении», но термин «просветление» уже устоялся в научном сообществе, и мы будем его придерживаться.

В последнее время активно обсуждается вопрос применения наноструктурированных просветляющих покрытий, в том числе на основе плазмонных и диэлектрических частиц [2–4]. Физика взаимодействия таких наночастиц со светом различна. Внутри металлических частиц возникают колебания электронной плотности, что приводит к возникновению так называемых плазмонных мод [5], электрические поля которых локализованы вблизи поверхности частицы. Плазмонные частицы, расположенные на поглощающей подложке, усиливают поле в ней за счет локализованных «горячих пятен», а также за счет дополнительного рассеяния света в направлении падения [6]. Частицы из материалов с высоким положительным показателем преломления взаимодействуют со светом как резонаторы [7], локализуя электромагнитное поле внутри наночастицы. Говоря о материалах с высоким показателем преломления, мы обычно имеем в виду полупроводники, но мы будем следовать традиции зарубежной литературы и называть их диэлектриками, так как в данном контексте не играет роли их способность к проводимости. При этом, в соответствии с теорией Ми, в разложении света, рассеянного от диэлектрических частиц, присутствуют компоненты, соответствующие как электрическому, так и магнитному отклику, в отличие от плазмонных частиц, в которых магнитный отклик отсутствует. Наличие магнитного дипольного Ми-резонанса в диэлектрических наночастицах, в частности, обуславливает так называемый эффект Керкера, связанный с направленным рассеянием света на определенной частоте [7–9]. Такие частицы, помещенные на поверхность подложки, также могут реализовывать условие Керкера, за счет направленного рассеяния увеличивая прохождение света в нее.

Анализ существующих решений

Существует ряд работ, посвященных просветляющим свойствам наноструктурированных покрытий на основе плазмонных и диэлектрических частиц [10–12] (рис. 1, а). Однако большинство этих работ не учитывают сложной структуры тонкопленочной солнечной батареи (ТСБ), для которой обычно предназначены такие покрытия. Пример слоистой структуры ТСБ приведен на рис. 1, б. Указанные на рисунке толщины слоев являются характерными для тонкопленочных солнечных батарей, в дальнейших вычислениях мы их придерживаемся [13]. Здесь слои аморфного кремния формируют активную область ТСБ, поглощение энергии в котором преобразуется в ток свободных зарядов. Разделение носителей осуществляется за счет разности потенциалов в p - i - n -переходе активного слоя, образованного слоями кремния разных типов легирования (p -Si, i -Si и n -Si на схеме рис. 1, б) [14]. Поглощение солнечной энергии в активной области зависит от интенсивности света, прошедшего в нее. Оставшаяся часть энергии отражается от поверхности кремния, тем самым уменьшая КПД батареи.

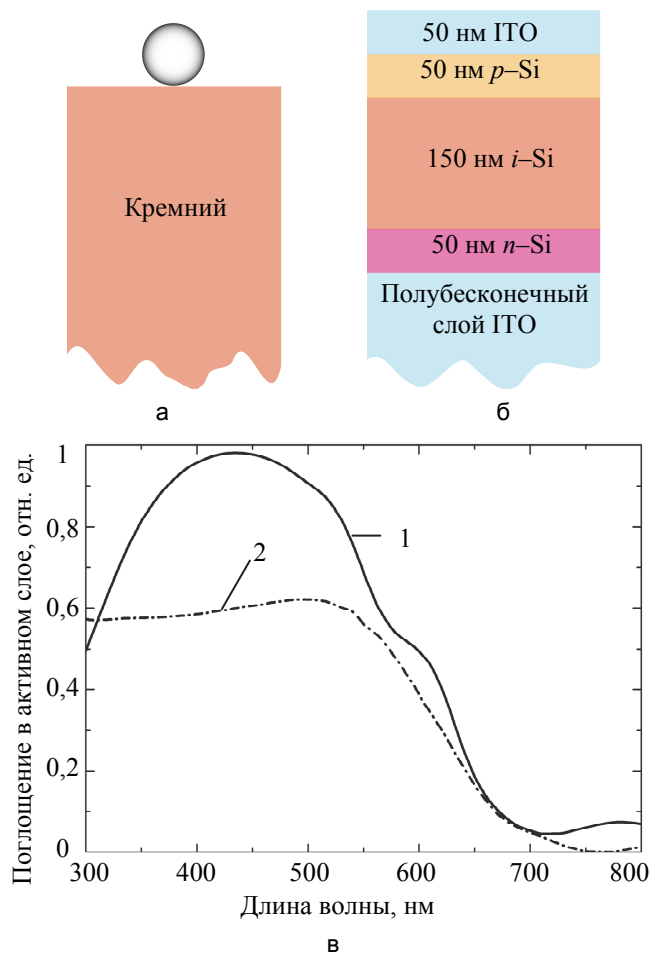


Рис. 1. Просветляющее покрытие на основе упорядоченной решетки наночастиц на плоской поверхности кремния (а). Схема типичной структуры тонкопленочной солнечной батареи (б). Спектры поглощения света в активной области тонкопленочной солнечной батарее при наличии однородного покрытия ИТО (1) и без покрытия (2) (в)

Подложка оксида индия-олова (Indium Tin Oxide, ИТО) имеет толщину порядка миллиметра, что во много раз превышает толщины других слоев, поэтому на схеме она обозначена как «полубесконечная». Верхний слой ИТО играет роль просветляющего покрытия. Было произведено численное моделирование поглощения в активной области структуры, изображенной на рис. 1, б, при наличии покрытия ИТО и в его отсутствие. Расчет производился в коммерческом пакете CST Microwave Studio. Оптические параметры материалов задавались согласно экспериментально измеренным данным, приведенным в работах [15–18]. На основании результатов расчета, приведенных на рис. 1, в, можно сделать вывод, что покрытие толщиной 50 нм дает выигрыш в поглощении 45% интегрально по всему оптическому диапазону для нормального падения света. В работе [19] показано, что уменьшение отражения света от поверхности фотоэлемента может быть достигнуто самым разнообразным структурированием покрытия: используются композитные, градиентные, светоулавливающие покрытия на базе наноструктур. Ниже мы проанализируем, может ли композитное покрытие, полученное путем включения в имеющийся просветляющий слой ИТО резонансных наночастиц, улучшить поглощение в активном слое элемента.

Методика расчета

Приведенная на рис. 1, б, конфигурация ТСБ является типовой, и каждый из ее слоев выполняет функции, необходимые для ее работы: *p-i-n*-слои служат для поглощения света и разделения зарядов, верхний и нижний слои ИТО одновременно выполняют функции верхнего и нижнего контактов.

В ТСБ на основе кремния не применяются распространенные сетчатые контакты, так как длина пробега зарядов в кремнии значительно меньше периода такой сетки, поэтому в расчетах обязательно нужно учитывать плоский верхний контакт, обладающий просветляющими свойствами. В настоящей работе исследуется вопрос одновременного использования однородного просветляющего (рис. 1, б) и наноструктурированного (рис. 1, а) покрытий в некотором едином композитном покрытии (рис. 2).

При моделировании рассматривается две геометрии: наночастицы на поверхности верхнего контакта ИТО (рис. 2, а) и наночастицы в матрице ИТО непосредственно на поверхности активного слоя (рис. 2, б). Так как толщина покрытия ИТО сравнима с величиной частиц, во втором случае при моделировании учитывается его рельеф (рис. 2, б).

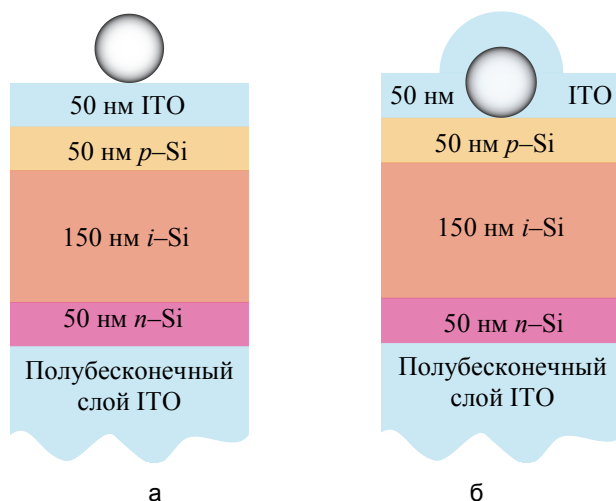


Рис. 2. Варианты композиционного покрытия: расположение наноструктурированного покрытия на поверхности ИТО (а); расположение наноструктурированного покрытия на поверхности активного слоя (б)

Наноструктурированное покрытие представляет собой двумерный упорядоченный массив сферических частиц, радиус частицы r , период структуры d . Такая форма частиц была выбрана как наиболее распространенная и легко получаемая, высадка таких частиц из коллоидного раствора или самоорганизация их на поверхности относительно дешева, а в производстве ТСБ фактор стоимости является принципиально важным. Главной моделируемой величиной является поглощение света в активной области, так как ему пропорционален фототок батареи [14]. Другой важной величиной является поглощение света в самом покрытии. С одной стороны, спектры этого поглощения дают представление о резонансном поведении покрытия (на частоте резонанса поглощение сильно возрастает), с другой – позволяют оценить, какая часть энергии теряется на паразитный нагрев покрытия. Поглощение в области рассчитывалось по формуле

$$\eta(\lambda) = \frac{1}{P_0} \int a(\lambda) |\mathbf{E}|^2 dV,$$

где $a(\lambda)$ – коэффициент поглощения в материале; \mathbf{E} – электрическое поле в области; P_0 – плотность падающего потока, dV – бесконечно малый объем области, по которой ведется интегрирование.

Расчеты производились в пакете CST Microwave Studio (www.cst.com) с использованием метода конечных разностей в частотном режиме (finite difference frequency domain method, FDFD). Периодические граничные условия и возбуждение с помощью волнового порта задают нужную конфигурацию расчета. Расчетный диапазон длин волн совпадает с главной зоной активности Солнца – это оптический и ближние инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны.

Результаты моделирования

Результаты расчетов спектров поглощения представлены на рис. 3. Графики (рис. 3, а, в) соответствуют наноструктурированному покрытию на поверхности плоского слоя ИТО (рис. 2, а), а графики (рис. 3, б, г) – покрытию, расположенному в объеме ИТО на поверхности активного слоя (рис. 2, б). Параметры серебряного покрытия: $r = 30$ нм, $d = 125$ нм, кремниевого – $r = 60$ нм, $d = 250$ нм. Указанные па-

раметры характерны для иллюстрации особенностей таких покрытий, и в дальнейшем мы будем варьировать их вблизи этих пределов. Для случая расположения частиц на поверхности ИТО кривая поглощения серебряной частицы имеет резонансную особенность вблизи частоты плазмонного резонанса (рис. 3, а). Для диэлектрической частицы в этом случае имеются две особенности, соответствующие электрическому и магнитному дипольным резонансам. В спектрах поглощения энергии в активном слое заметны резкие провалы, соответствующие частотам резонансов (рис. 3, в). Эти провалы связаны с резким увеличением поглощения частиц покрытия на резонансных частотах. Однако и на большинстве других частот оптического диапазона наблюдается спад поглощения по отношению к случаю однородного покрытия ИТО, исключая небольшой интервал частот вблизи края поглощения аморфного кремния, однако этот положительный вклад ничтожен по сравнению с общим отрицательным вкладом. В случае расположения частиц на поверхности активного слоя спектры поглощения частиц сильно видоизменены по сравнению со случаем расположения частиц на поверхности ИТО (рис. 3, б). Для серебряной частицы сохраняется уширенная резонансная особенность вблизи резонансной частоты, которая сдвигается в красную область. Для диэлектрической же частицы форма кривой полностью деформируется. Это связано с тем, что мода колебаний кремниевой частицы взаимодействует с окружением значительно сильнее, чем плазменная мода в серебряной частице. Происходит так называемая «утечка» как электрической, так и магнитной моды колебаний в окружении частицы. При этом начинают сильнее проявляться квадрупольные особенности. Спектры поглощения в активном слое в случае расположения частиц на поверхности активного слоя соотносятся со спектрами поглощения в частицах тем же образом, что и в случае расположения частиц на поверхности ИТО (рис. 3, г). В этом случае положительный вклад вблизи края поглощения кремния сильнее, однако он по-прежнему много меньше отрицательного вклада в остальной области спектра.

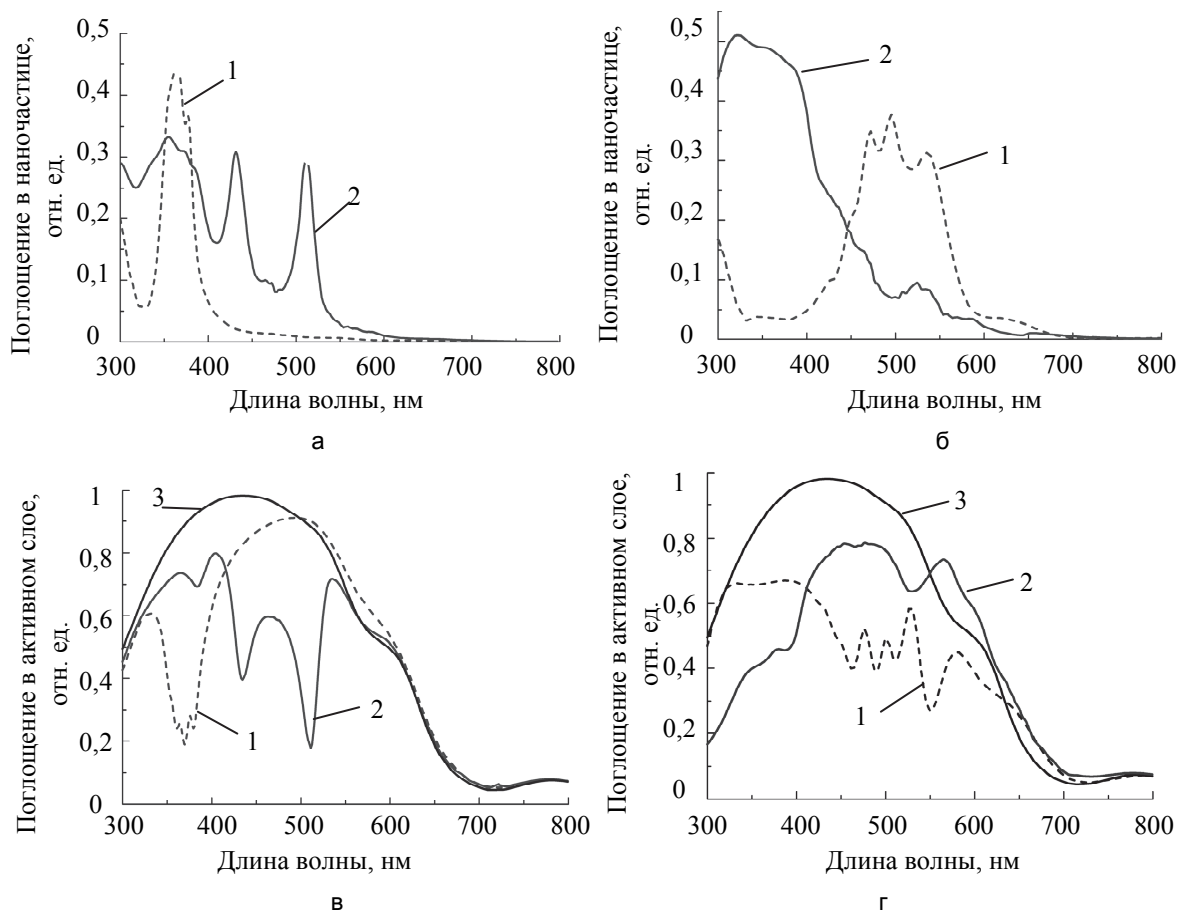


Рис. 3. Нормированное поглощение света в одной частице покрытия (а), (б). Нормированное поглощение света в активном слое ТСБ (в), (г). Вариант расположения частиц на поверхности ИТО (а), (в), вариант расположения частиц на поверхности активного слоя в объеме ИТО (б), (г). Композитное покрытие на основе серебряных частиц $r = 30$ нм, $d = 125$ нм (1), композитное покрытие на основе частиц кремния $r = 60$ нм, $d = 250$ нм (2), однородное покрытие ИТО (3)

Проанализировав зависимость поглощения от параметров покрытия, получили кривые зависимости усиления интегрального поглощения от радиуса частицы для обоих вариантов расположения частиц в композитном слое (рис. 4, а, б). Усиление интегрального поглощения рассчитывалось по формуле

$$G_l = \frac{\iint a(\lambda) |\mathbf{E}(r, \lambda)|^2 d^3 r d\lambda}{\iint a(\lambda) |\mathbf{E}_0(r, \lambda)|^2 d^3 r d\lambda} - 1,$$

где \mathbf{E} – поле в активной области при наличии композитного покрытия; \mathbf{E}_0 – поле при наличии однородного покрытия, интегрирование ведется по области активного слоя в диапазоне длин волн 300–800 нм; r – координата точки в объеме, по которому ведется интегрирование, λ – длина волны в диапазоне 300–800 нм.

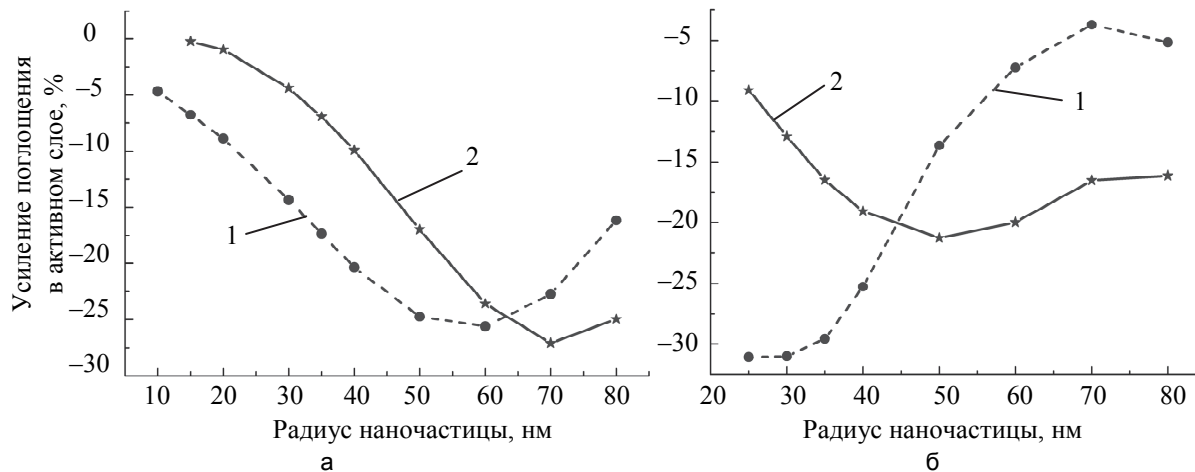


Рис. 4. Зависимость интегрального усиления поглощения от размера частиц покрытия: вариант расположения частиц на поверхности ИТО (а); вариант расположения частиц на поверхности активного слоя в объеме ИТО (б). Композитное покрытие на основе серебряных частиц (1), композитное покрытие на основе частиц кремния (2)

Отметим, что при изменении размера частицы пропорционально изменялось и расстояние между частицами, так что фактор заполнения частиц оставался постоянным. Несмотря на различные формы кривых в двух рассмотренных случаях, оба типа покрытий отрицательно влияют на поглощение в активной области для всех рассмотренных размеров частиц. В случае расположения частиц на поверхности плоского слоя ИТО это связано с нарушением условий интерференции для плоского покрытия ИТО. В случае расположения частиц в толще ИТО на поверхности активного слоя это связано как с невыполнением условия интерференции, так и с разрушением резонансной структуры покрытия. Дополнительные вычисления показали, что если рассматривать изначально не оптимизированную толщину слоя ИТО, то включение частиц позволяет усилить поглощение в активном слое, однако общая эффективность конверсии не превосходит показанную на рис. 1, в.

Полученный результат говорит о том, что для достижения требуемого эффекта усиления поглощения за счет использования композитных покрытий требуется существенная оптимизация параметров. В ряде работ используются сложные алгоритмы оптимизации, среди которых стоит выделить генетические алгоритмы [20]. В работе [20] указано, что, если взять за основу не сферические, а цилиндрические частицы, то свойства композитного покрытия могут превзойти свойства однородного. Однако такое покрытие может быть получено только дорогостоящими методами литографии, что серьезно ограничивает применение таких покрытий в тонкопленочной фотовольтаике, где крайне важен фактор дешевизны искомого продукта. Требуется дальнейший поиск оптимальных параметров наноструктурированных покрытий, однако он лежит вне рамок этой работы и является предметом дальнейших исследований.

Заключение

В работе на основе численного расчета проведен анализ эффективности просветляющих покрытий на основе плазмонных серебряных (Ag) и диэлектрических кремниевых (Si) наночастиц для фотовольтаических кремниевых структур. Показано, что внедрение наночастиц в покрытие приводит к существенному искажению спектра поглощения в активной области в диапазоне длин волн 300–800 нм и появлению на нем резонансных особенностей. Последнее связывается нами с резонансными свойствами наночастиц. Показано, что резонансный отклик частиц, располагающихся на поверхности ИТО, сходен с откликом свободных частиц. При этом на резонансных частотах происходит резкое уменьшение поглощения света в активном слое. Резонансный отклик наночастиц, расположенных в объеме слоя ИТО, значительно отличается от отклика свободных частиц: уменьшается резонансная частота, снижается добротность. Показано, что при увеличении размера Ag- и Si-наночастиц, располагающихся на поверхности ИТО, происходит уменьшение интегрального поглощения до 25%. Для Ag-частиц, располагающихся в объеме ИТО, характерно монотонное уменьшение интегрального поглощения до 30% при уменьшении их

размера. Максимальное влияние на интегральный показатель поглощения оказывают Si-частицы размером 50 нм. Таким образом, внедрение плазмонных и диэлектрических сферических наночастиц в слоистую структуру тонкопленочной солнечной батареи с плоскими контактами ухудшает поглощательные свойства батареи, а следовательно, и ее общий КПД. Необходимы дальнейший поиск оптимальных параметров композитных просветляющих покрытий либо принципиально иной подход к наноструктурированию, применение композитных градиентных или композитных светоулавливающих покрытий, что должно стать предметом дальнейших исследований разработчиков фотовольтаических систем.

Литература

1. Raut H.K., Ganesh V.A., Nair A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: a critical, in-depth review // *Energy and Environmental Science*. 2011. V. 4. N 10. P. 3779–3804. doi: 10.1039/c1ee01297e
2. Catchpole K.R., Polman A. Plasmonic solar cells // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 26. P. 21793–21800. doi: 10.1364/OE.16.021793
3. Atwater H.A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials*. 2010. V. 9. N 3. P. 205–213. doi: 10.1038/nmat2629
4. Brongersma M.L., Cui Y., Fan S. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures // *Nature Materials*. 2014. V. 13. N 5. P. 451–460. doi: 10.1038/nmat3921
5. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W. Surface plasmon subwavelength optics // *Nature*. 2003. V. 424. N 6950. P. 824–830. doi: 10.1038/nature01937
6. Novotny L., Hecht B. *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University Press, 2006. 539 p.
7. Evlyukhin A.B., Novikov S.M., Zywiets U., Eriksen R.L., Reinhardt C., Bozhevolnyi S.I., Chichkov B.N. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region // *Nano Letters*. 2012. V. 12. N 7. P. 3749–3755. doi: 10.1021/nl301594s
8. Kerker M., Wang D.-S., Giles C.L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // *Journal of the Optical Society of America*. 1983. V. 73. N 6. P. 765–767.
9. Person S., Jain M., Lapin Z., Saenz J.J., Wicks G., Novotny L. Demonstration of zero optical backscattering from single nanoparticles // *Nano Letters*. 2013. V. 13. N 4. P. 1806–1809. doi: 10.1021/nl4005018
10. Ferry V.E., Munday J.N., Atwater H.A. Design considerations for plasmonic photovoltaics // *Advanced Materials*. 2010. V. 22. N 43. P. 4794–4808. doi: 10.1002/adma.201000488
11. Akimov Y.A., Koh W.S., Sian S.Y., Ren S. Nanoparticle-enhanced thin film solar cells: Metallic or dielectric nanoparticles? // *Applied Physics Letters*. 2010. V. 96. N 7. Art. 073111. doi: 10.1063/1.3315942
12. Van De Groep J., Polman A. Designing dielectric resonators on substrates: combining magnetic and electric resonances // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 22. P. 26285–26302. doi: 10.1364/OE.21.026285
13. Ernst K., Belaidi A., Konenkamp R. Solar cell with extremely thin absorber on highly structured substrate // *Semiconductor Science and Technology*. 2003. V. 18. N 6. P. 475–479. doi: 10.1088/0268-1242/18/6/314
14. Nelson J. *The Physics of Solar Cells*. London, Imperial College Press, 2003. 384 p.
15. Aspnes D.E., Studna A.A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // *Physical Review B*. 1983. V. 27. N 2. P. 985–1009. doi: 10.1103/PhysRevB.27.985
16. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals // *Physical Review B*. 1972. V. 6. N 12. P. 4370–4379. doi: 10.1103/PhysRevB.6.4370
17. Konig T.A.F., Ledin P.A., Kerszulis J., Mahmoud M.A., El-Sayed M.A., Reynolds J.R., Tsukruk V.V. Electrically tunable plasmonic behavior of nanocube-polymer nanomaterials induced by a redox-active electrochromic polymer // *ACS Nano*. 2014. V. 8. N 6. P. 6182–6192. doi: 10.1021/nn501601e
18. Stutenbaumer U., Mesfin B., Beneberu S. Determination of the optical constants and dielectric functions of thin film a-Si:H solar cell layers // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1999. V. 57. N 1. P. 49–59.
19. Raut H.K., Ganesh V.A., Nair A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: a critical, in-depth review // *Energy and Environmental Science*. 2011. V. 4. N 10. P. 3779–3804. doi: 10.1039/c1ee01297e
20. Spinelli P., Verschuuren M.A., Polman A. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators // *Nature Communications*. 2012. V. 3. Art. 692. doi: 10.1038/ncomms1691

Барышникова Ксения

Владимировна

Петров Михаил Игоревич

– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, k.baryshnikova@phoi.ifmo.ru

– кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; доцент, Академический Университет, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, trisha.petrov@gmail.com

Бабичева Виктория Евгеньевна

– Ph.D., научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Центр Нанооптики Университета штата Джорджия, Атланта, GA 30302, США, baviev@gmail.com

- Чебыкин Александр Васильевич* – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alex.chebykin@phoi.ifmo.ru
- Белов Павел Александрович* – главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, belov@phoi.ifmo.ru
- Kseniya V. Baryshnikova* – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, k.baryshnikova@phoi.ifmo.ru
- Mihail I. Petrov* – PhD, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; research fellow, Academic University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, trisha.petrov@gmail.com
- Viktoriya E. Babicheva* – PhD, scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; research fellow, Center for Nano-Optics of the Georgia State University, Atlanta, GA 30302, USA, baviev@gmail.com
- Alexander V. Chebykin* – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alex.chebykin@phoi.ifmo.ru
- Pavel A. Belov* – chief research fellow, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, belov@phoi.ifmo.ru