

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Юлдашева Н., Алиев Р., Насиров М.

Андижанский государственный университет,  
Узбекистан

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕДРЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ

**Аннотация.** В работе определены сечения фотоэмиссии из металлических наночастиц и изучена зависимость сечения от работы выхода электронов, от размера наночастиц и от материала. Разработана программа на Visual Basic-6.0 для вычисления сечения фотоэлектронной эмиссии из металлических наночастиц в зависимости от длины волны падающего света. Программа позволяет вводить и изменить значения энергии выхода, энергии Ферми, приведенную массу электрона, параметров плазмонных процессов, размеров наночастиц и т. п. Определены оптимальные размеры наночастицы металлов для достижения более эффективной реализации эффекта наноплазмоники и показано, что в качестве материала наночастицы может быть использован не только дорогостоящие золото и серебро, но и медь.

**Abstarct.** Photoemission cross-sections of metallic nanoparticles were determined and the dependence of the cross-section on the work of the electron yield, on the size of the nanoparticles and on the material was studied. The program on Visual Basic-6.0 for calculation of section of photoelectronic emission from metal nanoparticles depending on wavelength of incident light is developed. The program allows you to enter and change the values of the output energy, Fermi energy, reduced electron mass, parameters of plasmon processes, nanoparticle sizes, etc. The optimal sizes of metal nanoparticles are determined to achieve a more effective implementation of the nanoplasmonics effect and it is shown that not only expensive gold and silver, but also copper can be used as a nanoparticle material.

*Ключевые слова:* наночастица, плазмон, сечение фотоэмиссии, кремний, солнечный элемент, диэлектрическая функция

*Keywords:* nanoparticle, plasmon, photoemission cross-section, silicon, solar cell, dielectric function

Эффективность фотоэлектрического преобразования энергии при помощи полупроводниковых структур или солнечных фотоэлементов (СФЭ) состоит из суммирования эффективности поглощения (ЭП) солнечного излучения, эффективности фотогенерации (ЭГ) носителей заряда (НЗ) и эффективности сбора (ЭС) неравновесных неосновных НЗ [1].

Определение первых двух видов составляющих эффективности СФЭ, т.е. «ЭП» и «ЭГ» непосредственно связаны с оптическими свойствами материала, конструкцией СФЭ и спектральным составом падающего на него излучения. Поэтому, их вместе можно рассматривать в качестве оптической эффективности СФЭ.

Огромная часть теоретических и экспериментальных исследовательских работ были посвящены снижению рекомбинационных потерь на фронтальной и тыльной поверхностях, а также в объеме кремния, т.е. по «ЭС». Были созданы СФЭ с внутренними электрическими полями: потенциально барьерные структуры в эмиттерной области и изотипные (р-р<sup>+</sup> или п-п<sup>+</sup>) переходы вблизи тыльной поверхности. Разработаны СФЭ, имеющие электродные системы с подлегированием (р<sup>+</sup> или п<sup>+</sup>) и углубленным размещением их в кремнии, а также СФЭ с р-п-переходами, размещенными на тыльной стороне. Указанные конструкции СФЭ преобладали существенно сниженными рекомбинационными потерями НЗ и,

соответственно, высокими значениями эффективности сбора НЗ.

Эффективность фотогенерации НЗ зависит только от энергии поглощенных полупроводником фотонов и поэтому, по нашему мнению, серьезных исследований в этом направлении, т.е. по «ЭГ», почти не проведены до недавних времен. С развитием нанотехнологии и науки о различных наноразмерных эффектах представляется важным рассмотреть возможности усовершенствования процессов фотогенерации, способствующих дальнейшему повышению эффективности СФЭ.

Поиск путей повышения эффективности поглощения солнечного излучения, т.е. «ЭП» давно ведется учеными многих научных центров развитых стран. В первую очередь вызывает интерес максимальное снижение отражения света от поверхности СФЭ и при этом обеспечении пассивации поверхности. Для этой цели используются многослойные антиотражающие покрытия (АОП) и современные пути текстурирования поверхности. Формирование на поверхности кремния текстуру или нанотекстуру с нанесенным дополнительным АОП приводит к существенному снижению отражения нормально падающего излучения.

В работах [2, 3] проведен анализ и оптимизация просветляющих покрытий на поверхности кремниевых солнечных элементов. Исследованы различные конструкции просветляющих покрытий для защитного стекла солнечной батареи и выбор оптимальной из них.

Для каждой конструкции была рассчитана интегральная эффективность с учетом распределения интенсивности солнечного излучения по спектру и спектральной чувствительности солнечного элемента.

Для улучшения поглощения света особенно в тонких слоях кремния применяются различные инновационные технологии. К ним относятся - текстурирование и наноструктурирование поверхности, а также эффекты наноплазмоники [4, 5].

Выполненные по настоящее время текстурирование и наноструктурирование поверхности СЭ позволяли значительно снизить отражение света от поверхности и тем самым повысить их эффективность [4]. Предложен перспективный способ повышения эффективности СЭ за счет реализации эффекта плазмоники.

Созданы оптические пленки с квантовыми точками (КТ) из наночастиц металла, которые могут быть нанесены на поверхность СЭ [5].

Сущность такого квантово-размерного эффекта заключается в том, что при поглощении энергии фотонов наночастицами металла на его поверхности наблюдается фотоэлектронная эмиссия. Электроны, эмиссионные из наночастицы металла образует электронное облако вокруг наночастицы. Под действием электромагнитного поля наблюдается коллективное колебание электронов и при соответствующих частотах наблюдается резонанс колебания электронного облака. Это может вызвать генерацию дополнительного электрона проводимости в объеме или фотона и тем самым внести вклад в общий процесс фотогенерации неравновесных носителей заряда.

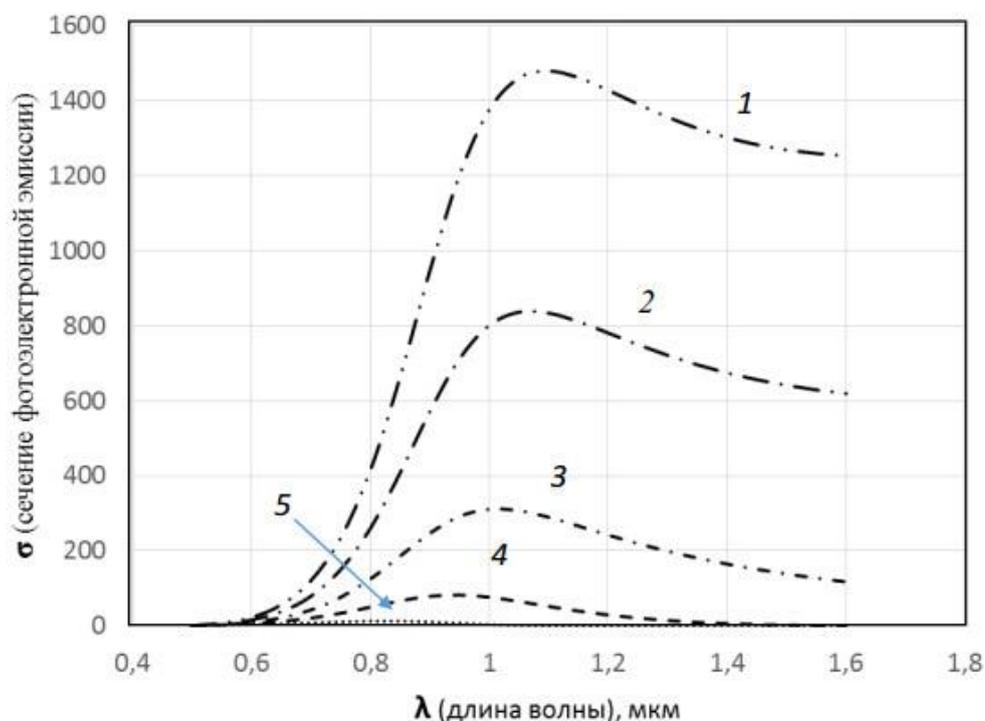


Рис. 1. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (Au) в кремнии в зависимости от значений взаимной разницы работ выхода Si и Au:  $\Delta A=0,2$  eV (кривая 1);  $\Delta A=0,7$  eV (кривая 1);  $\Delta A=1,2$  eV (кривая 1);  $\Delta A=1,7$  eV (кривая 1);  $\Delta A=2,2$  eV (кривая 1).

В данной работе определены сечения фотоэмиссии из металлических наночастиц и изучена зависимость сечения от работы выхода электронов, от размера наночастиц и от материала. В работе [4] рассмотрены сечения фотоэмиссии из золотых наночастиц с учетом локализованного плазмонного резонанса (ЛПР).

Сечения фотоэлектронной эмиссии из металлических наночастиц определяется из выражения

$$\sigma_{ph-em} = \frac{8\pi\hbar\omega}{cn_+} C_{emission} |F|^2 K_{geometry}, \quad (1)$$

$$n_+ = Re\sqrt{\epsilon_+}$$

Вероятность фотоэлектронной эмиссии в выражении (1) может быть представлен в виде:

$$C_{em} = \frac{e^2 k T V^2}{\pi^2 \hbar^5 \omega^4} \int dx [1 + (\hbar\omega/V - 1)/x]^{1/2} \ln(1 + \exp(\frac{E_f - Vx}{kT})) U(x) |K_{dis}(x)|^2$$

в котором функции

$$U(x) = \frac{4r_m^2}{(r_m + 1)^2} \frac{x}{[x + r_m(1-x)] \{ (x + \hbar\omega/V)^{1/2} + [r_m(x + \hbar\omega/V - 1)]^{1/2} \}^2},$$

$$K_{dis}(x) = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_- / \varepsilon_+) [1 + \frac{1-r_m}{1+r_m} (2x + \hbar\omega/V - 1)] + \frac{1}{2} (1 - \varepsilon_- / \varepsilon_+) [x + \hbar\omega/V]^{1/2} + i(1-x)^{1/2}]^2$$

учитывают скачкообразного изменения электрического поля на границе наночастицы. А функции

$$F = \frac{1}{1 + R_{dep} - iR_{rad}} \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L}, \quad R_{dep} = \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L} (A\varepsilon_+ y^2 + B\varepsilon_+^2 y^4),$$

$$R_{rad} = \frac{16}{9r} \left(\frac{\pi m_+ a}{\lambda}\right)^3 \frac{\varepsilon_+}{\varepsilon_+ + (\varepsilon_- - \varepsilon_+)L}, \quad L = \frac{r^2}{2} \int \frac{du}{(u+r^2)^2 (u+1)^{1/2}}$$

учитывают деполяризационные и радиационные потери. При этом вид и размера наночастицы учитывается выражением функции:

$$K_{geom} = \frac{\pi a^2}{r} \left[ \frac{r}{1-r^2} + \frac{1-2r^2}{(1-r^2)^{3/2}} \arcsin(1-r^2) \right]^{1/2}$$

В зависимости от длины волны падающего света диэлектрическая функция для металла и кремния, соответственно имеет вид:

$$\varepsilon_-(\lambda) = \varepsilon_{металл}(\lambda) + (\lambda/\lambda_p)^2 \left[ \frac{1}{1+i\lambda/\lambda_f} - \frac{1}{1+(i\lambda/\lambda_f)(a_c/a+1)} \right],$$

$$\varepsilon_{металл}(\lambda) = A_\varepsilon + (\lambda/\lambda_p)^2 \frac{1}{1+i\lambda/\lambda_f},$$

$$\varepsilon_+(\lambda) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{1 - (\frac{1.242}{\lambda E_i})^2 - i \frac{1.242}{\lambda E_i} \gamma_i} - F_1 \chi_1^{-2}(\lambda) \ln[1 - \chi_1^2(\lambda)] - F_2 \chi_2^{-2}(\lambda) \ln \frac{1 - \chi_1^2(\lambda)}{1 - \chi_2^2(\lambda)}.$$

Параметры диэлектрической функции кремния взяты из работы [7]. А параметры диэлектрической функции металла ( $A_\varepsilon$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ) выбраны по методу наименьших квадратов, соответствующих экспериментальным данным, взятым из работы [6].

На основе приведенных выражений составлена программа на Visual Basic-6.0 для вычисления сечения фотоэмиссии из металлических наночастиц в зависимости от длины волны падающего света. Программа позволяет вводить и изменить энергию выхода, энергию Ферми, приведенную массу электрона, плазменных параметров, размеров наночастиц и т.п. Особенность программы состоит в том, что результаты расчетов в единой программной среде экспортируются на MS Excel и выражаются не только в табличном, но и в графическом виде [8]. Результаты расчета приведены в виде графиков на

рис. 1 – рис. 3. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (Au) в кремнии в зависимости от значений взаимной разницы работ выхода Si и Au (Рис. 1), где  $\Delta A=0,2$  eV (кривая 1),  $\Delta A=0,7$  eV (кривая 1),  $\Delta A=1,2$  eV (кривая 1),  $\Delta A=1,7$  eV (кривая 1),  $\Delta A=2,2$  eV (кривая 1) показывают, что указанный фактор является весьма существенным. Наиболее высокое значение сечения фотоэлектронной эмиссии наблюдается при  $\Delta A=0,2$  eV.

Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (Au) в кремнии (Рис. 2) в зависимости от их размера (при  $A=4,8$  eV), где  $a=5$  нм (кривая 1), 10 нм (кривая 2), 15 нм (кривая 3) показывают, наиболее высокое значение сечения фотоэлектронной эмиссии достигается при  $a=5$  нм (кривая 1). С ростом размера наночастицы золота сечение фотоэлектронной эмиссии снижается.

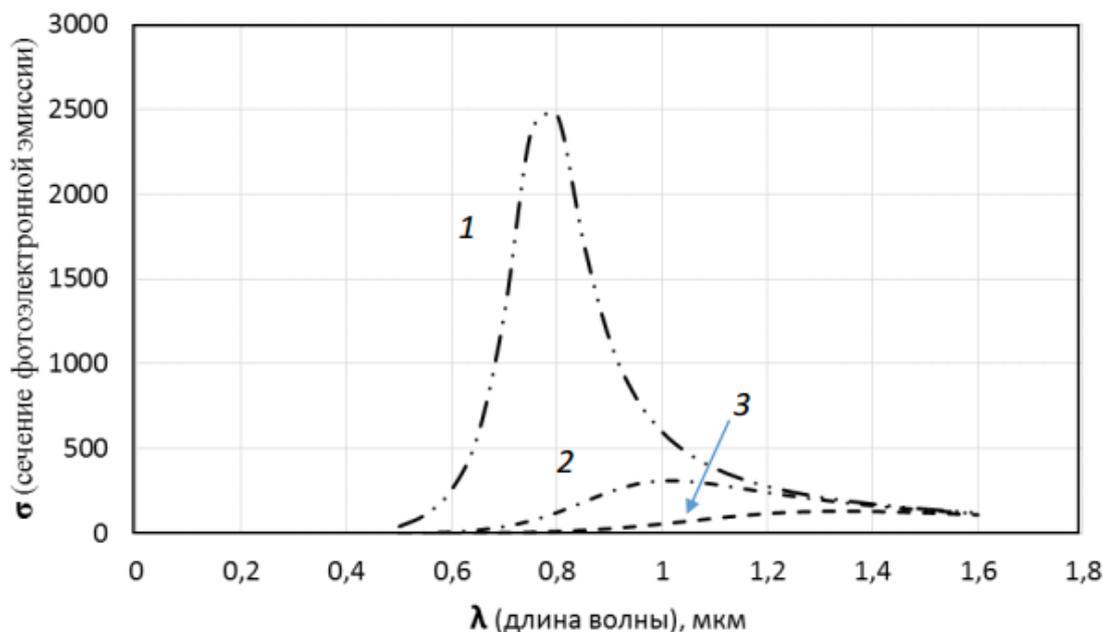


Рис. 2. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (Au) в кремнии в зависимости от их размера (при  $A=4,8$  eV):  $a=5$  нм (кривая 1); 10 нм (кривая 2); 15 нм (кривая 3).

По результатам расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (Рис. 3, кривая 1 для Cu, кривая 2 для Ag, кривая 3 для Au) с размером  $a=10$  нм в кремнии ( $A=4,8$  eV) свидетельствует о том, что в

качестве материала наночастицы может быть использован не только дорогостоящий золото, а и серебро и медь. Причем наночастицы меди имеют наиболее высокие значения сечения фотоэлектронной эмиссии.

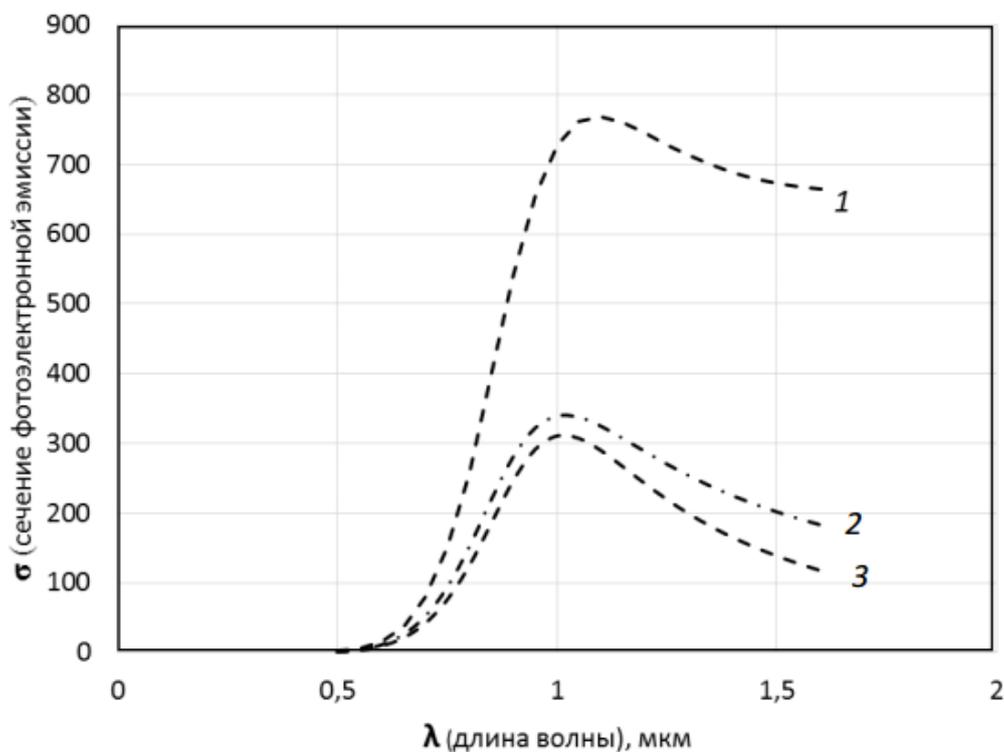


Рис. 3. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии ( $\sigma$ ) наночастиц металла (кривая 1 для Cu; кривая 2 для Ag; кривая 3 для Au) с размером  $a=10$  нм в кремнии ( $A=4,8$  eV).

Таким образом, наиболее значимыми результатами проведенного исследования являются следующие:

- Разработана программа на Visual Basic-6.0 для вычисления сечения фотоэлектронной эмиссии из металлических наночастиц в зависимости от длины волны падающего света. Программа позволяет вводить и изменить значения энергии выхода, энергии Ферми, приведенную массу электрона, параметров плазменных процессов, размеров наночастиц и т. п. Результаты расчетов в единой программной среде экспортируются на MS Excel и выражаются не только в табличном, но и в графическом виде;

- Определены оптимальные размеры наночастицы металлов для достижения более эффективной реализации эффекта наноплазмоники;

- Показано, что в качестве материала наночастицы может быть использован не только дорогостоящие золото и серебро, но и медь. Причем наночастицы меди имеют наиболее высокие значения сечения фотоэлектронной эмиссии.

#### Литература

1. С.Зайнабидинов, Р.Алиев, М.Муйдинова, Б.Урманов Об оптической эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей

солнечной энергии. // Гелиотехника, 2018, №5, С. 3-9.

2. J. Zhao, Martin A. Green. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells // IEEE Transactions on electron devices. – 1991. – Vol. 38. – № 8. – P. 1925–1934.

3. Daniel J. Aiken. High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2000. – Vol. 64. – P. 393–404.

4. Климов В. Наноплазмоника. // Российские нанотехнологии. № 9-10. 2009 г. ([http://www.nanorf.ru/events.aspx?cat\\_id=223&d\\_no=1839](http://www.nanorf.ru/events.aspx?cat_id=223&d_no=1839))

5. J. Appl. Phys. – 2007. V. 101. P. 093105-1–093105-8.

6. Adachi S, Mori H, Ozaki S Phys. Rev. B 66 153201 (2002)

7. Weber M. J. Handbook of optical materials (Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2003).

8. С.Р.Алиев, М.З.Насиров, Р.У.Алиев, Л.М.Мадумарова Наноплазмоника в фотовольтаике, Программный продукт для ЭВМ № DGU 03861, 2016.

9. Р.Алиев, М.Насиров Фотоэмиссия из металлических наночастиц -основа наноплазмонного эффекта. // Научный вестник АГУ, 2017, №2, с.15-19.