

ФОТОЭМИССИЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ В КРЕМНИЙ

Юлдашева Назокатхон Мурод кизи

Докторант Андижанского государственного университета

Андижан, Узбекистан

e-mail: nazokat1990@mail.ru

ABSTRACT

В работе рассматривается фотоэмиссия из металлических наночастиц с учетом возбуждения в них локализованного плазменного резонанса и изменения электромагнитного поля и массы электрона проводимости на границе металл-полупроводник. Приводятся численные расчеты по сечению, увеличения электрического поля внутри наночастиц, фотоэмиссионного тока и т.д. в зависимости от длины волны падающего света.

KEY WORDS

*локализованный
плазменный
резонанс,
наночастица,
поверхностная
фотоэмиссия,
сечение, длина
волны.*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, флюктуация электронной плотности наночастиц металлов имеет резонансную частоту в видимой и инфракрасной частях спектра — локализованный плазменный резонанс (ЛПР). Поэтому основной задачей наноплазмоники является изучение оптических и электрофизических процессов, вызванных ЛПР. ЛПР возникает, когда поверхностные заряды образуют потенциальную яму, а электроны в этой яме колеблются под действием внешнего электромагнитного поля (ЭМ). Частота ЛПР для мелких частиц не зависит от их размера, а зависит от их формы, материала и окружающей среды. При возбуждении ЛПР наночастица ведет себя как резонатор. Резонансные свойства металлических наночастиц и сбор ЭМ в их окружении позволяют наблюдать множество новых эффектов. На основе этих эффектов были предложены и реализованы оптоэлектронные устройства с плазмонными наночастицами [1, 2].

Одним из эффектов, возникающих при возбуждении ЛПР, является фотоэмиссия наночастиц. Фотоэмиссия наночастиц резко отличается от фотоэмиссии макроскопических металлических структур, потому что ЭМ внутри и вокруг наночастиц резко возрастает, а отношение поверхности наночастиц к объему намного выше, чем у макроскопических структур. Потому что большая площадь поверхности и высокая интенсивность ЭМ важны для фотоэмиссии. Таким образом, эмиссия фотоэлектронов на единицу массы наночастиц намного больше, чем у макроскопических структур. Повышение эффективности фотодетекторов за счет наночастиц имеет большое практическое значение. Для определения фотоэмиссии из наночастиц и ее оптимальных параметров необходимо определить сечение фотоэмиссии [3-5].

Настоящая работа посвящена изучению поверхностной фотоэмиссии металлических наночастиц с учетом возбуждения ЛПР и показано, что фотоэмиссия наночастиц более

эффективна, чем фотоэмиссия макроструктур. На поверхности металлических фотоприемников созданы микро- и наноструктуры для повышения их эффективности, но так как эти структуры имеют хороший электрический контакт с металлическими оболочками, в них нельзя возбуждать ЛПР и усиливать фотоэмиссию. Увеличение поверхностной фотоэмиссии металлических наночастиц за счет возбуждения ЛПР наблюдалось на практике, но теоретически и систематически этот процесс не изучался [6-8].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В данной работе рассмотрена поверхностная фотоэмиссия с металлических наночастиц с учетом возбуждения ЛПР, которая учитывает скачкообразные изменения электрического поля и массы электрона на поверхности, что приводит к резкому увеличению фотоэмиссии.

Сечение фотоэмиссии металлических наночастиц определяется из выражения [1, 9-12]

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

а фотоэмиссионный ток

$$J_{ph-em} = C_{em} |F|^2 K_{geom} |E|^2, \quad (2)$$

где $n_+ = \text{Re} \sqrt{\epsilon_+}$,

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

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

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

функция, учитывающая скачкообразного изменения электрического поля на границе;

$$F = \frac{1}{1 + R_{dep} - iR_{rad}} \frac{\epsilon_+}{\epsilon_+ + (\epsilon_- - \epsilon_+)L} -$$

фактор, учитывающий увеличения интенсивности электрического поля внутри наночастицы,

$$R_{dep} = \frac{\epsilon_+}{\epsilon_+ + (\epsilon_- - \epsilon_+)L} (A\epsilon_+ y^2 + B\epsilon_+^2 y^4), \quad R_{rad} = \frac{16}{9r} \left(\frac{\pi n_+ a}{\lambda}\right)^3 \frac{\epsilon_+}{\epsilon_+ + (\epsilon_- - \epsilon_+)L},$$

$$L = \frac{r^2}{2} \int \frac{du}{(u + r^2)^2 (u + 1)^{1/2}} -$$

- функции, учитывающие деполяризацию ва радиационных потерь;

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

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

- диэлектрические функции нанометалла и кремния [6, 12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На основе приведенных выражений составлена программа на Visual Basic-6.0 для вычисления плазменные параметры металлов, а также сечения, фотоэмиссионного тока и фактора увеличения интенсивности электрического поля внутри наночастицы 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 – 4.

В таблице приведены результаты расчетов плазменных параметров металлов. Для сравнения, там же приведены результаты работы [2] и значения χ^2 , указывающие точность вычислений.

Таблица. Плазменные параметры металлов

Элемент	$\lambda_p, \mu\text{м}$		ε_∞	χ^2
	расчет	[2]		
Au	0,143	0,138	7,492	8,763
Cu	0,149	0,141	3,412	6,296
Ag	0,126	0,136	4,056	6,781
Al	0,050	-	0,775	28,047
Ni	0,130	-	0,908	4,950
Pt	0,164	-	1,298	0,248
Zn	0,086	-	0,631	6,145
Ti	0,149	-	0,718	3,606

По результатам расчета спектральной зависимости сечении фотоэлектронной эмиссии (σ) наночастиц металла (Рис. 1) с размером $a=10$ нм в кремнии свидетельствует о том, что в качестве материала наночастицы может быть использован не только дорогостоящий золото, а серебро или медь. Причем наночастицы меди имеют наиболее высокие значения сечения фотоэлектронной эмиссии.

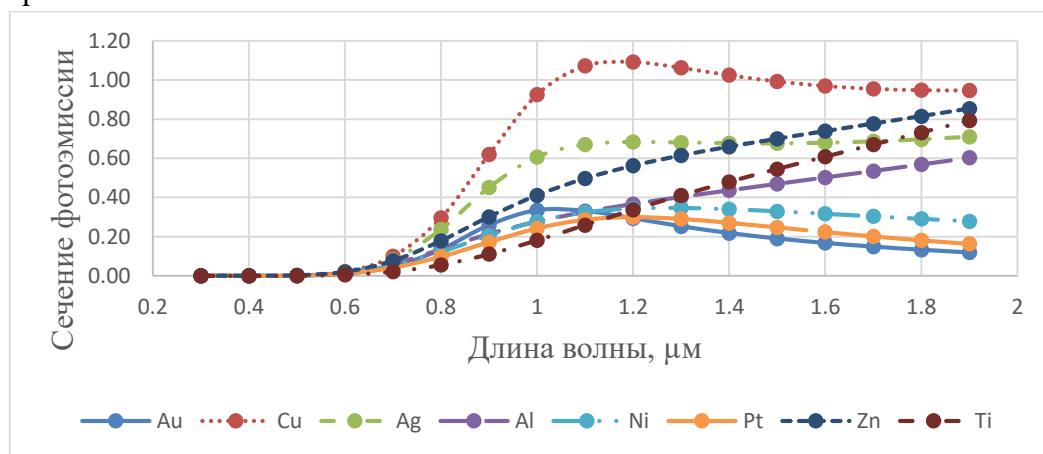


Рис. 1. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотоэлектронной эмиссии (σ) наночастиц металла с размером $a=10$ нм в кремнии.

На рис. 2 приведены результаты расчета спектральной зависимости сечения фотонной эмиссии (σ) наночастиц металла (Cu) в кремнии в зависимости от их размера. Как видно из рисунка, что наиболее высокое значение сечения фотонной эмиссии достигается при $a=4$ нм. С ростом размера наночастицы меди сечение фотонной эмиссии снижается и максимум кривой сдвигается вправо.

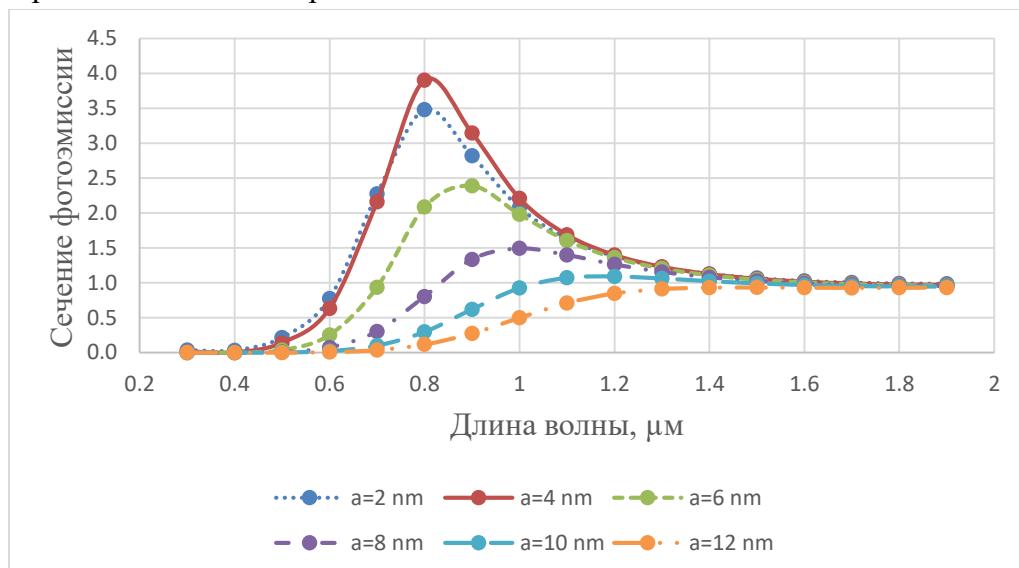


Рис. 2. Результаты расчета спектральной зависимости сечения фотонной эмиссии (σ) наночастиц металла (Cu) в кремнии в зависимости от их размера.

На рис. 3 приведены результаты расчета спектральной зависимости интенсивности электрического поля фотонной эмиссии (F^2) наночастиц металлов в кремнии. Как видно из рисунка, что наиболее высокое значение интенсивности достигается для золота.

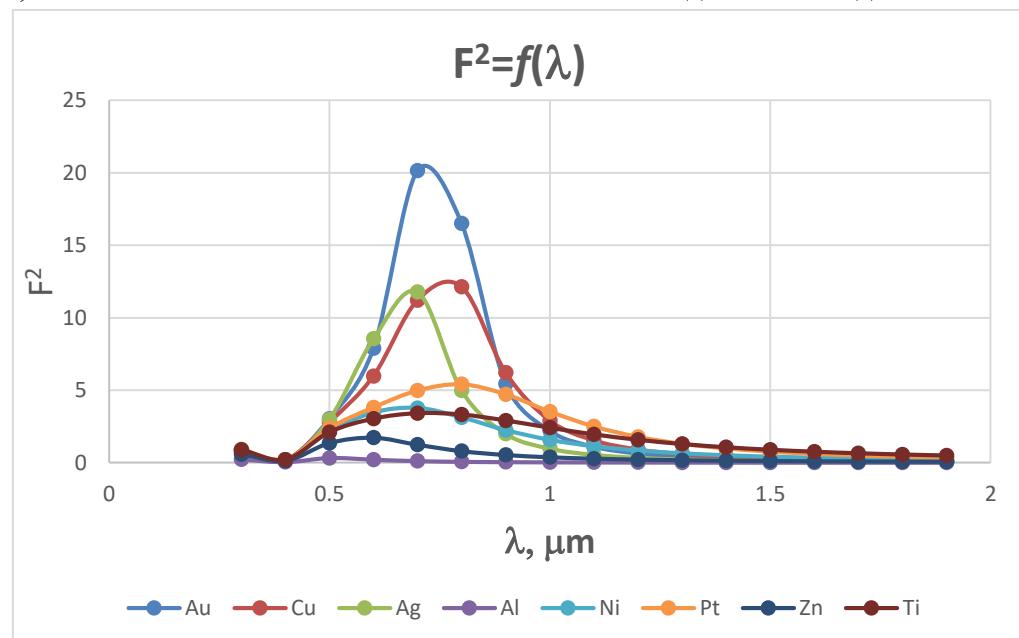


Рис. 3. Результаты расчета спектральной зависимости интенсивности электрического поля фотонной эмиссии (F^2) наночастиц металлов в кремнии.

На рис. 4 приведены результаты расчета спектральной зависимости фотоэмиссионного тока (J_{fem}) наночастиц металлов в кремнии. Как видно из рисунка, что наиболее высокое значение фотоэмиссионного тока достигается для серебра и меди.

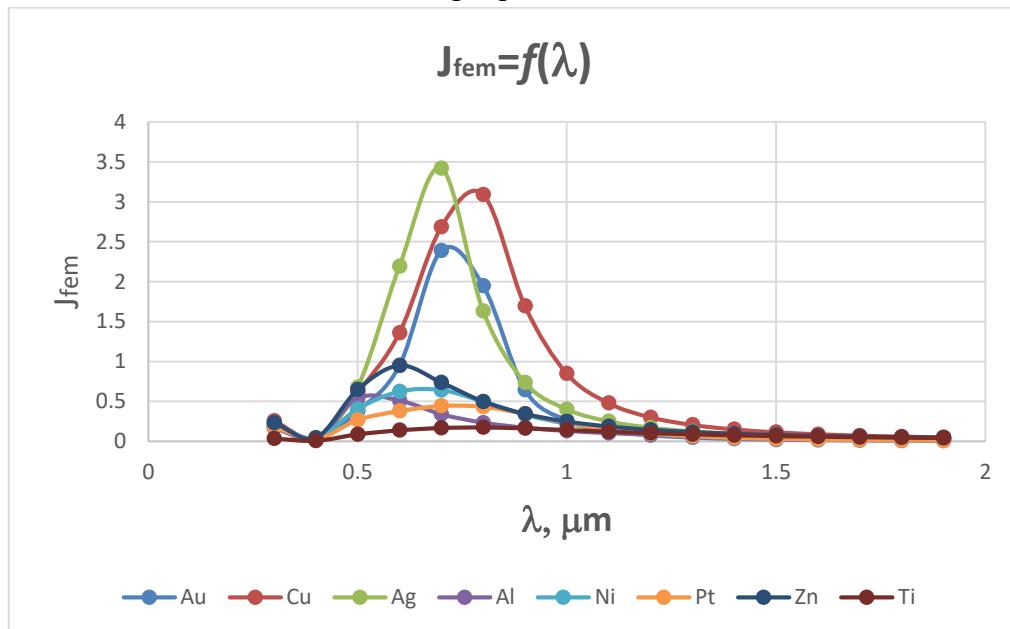


Рис. 4. Результаты расчета спектральной зависимости фотоэмиссионного тока (J_{fem}) наночастиц металлов в кремнии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее значимыми результатами проведенного исследования являются следующие:

- Разработана программа на Visual Basic-6.0 для вычисления плазменные параметры металлов, а также сечения, фотоэмиссионного тока и фактора увеличения интенсивности электрического поля внутри наночастиц в зависимости от длины волны падающего света. Программа позволяет вводить и изменять 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 наночастиц 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 и фотоэмиссионного тока.

1. Проценко И.Е., Усков А.В. //УФН, т.182, №5, 2012, с.543-554
2. Климов В В, *Нанолазмоника* (М.: Физматлит, 2009)
3. Novotny L, Hecht B *Principles of Nano-optics* (Cambridge Univ. Press, 2006)
4. Brongersma M L, Kik P G *Surface Plasmon Nanophotonics* (Springer, 2007)
5. Бродский А М, Гуревич Ю Я *Теория электронной эмиссии из металлов* (М.: Наука, 1973)
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.
10. Н.Юлдашева, Р.Алиев, М.Насиров Стабилизация характеристик кремниевых солнечных элементов внедрением наночастиц некоторых металлов//East European Scientific Journal, 2020, 4(56), p.67-71.
11. R.Aliev, M.Nosirov, J.Gulomov, J.Ziyaitdinov Modeling metal nanoparticles influence to properties of silicon solar cells//International journal advansed research, 2020, 8(11), c. 336-345.
12. N.Nosirov, N.Yuldasheva, S.Matboboeva, M.Mirzakarimova Dielectric functions of metals for nanoplasmonics//German International journal of Modern Sciences, 2022, № 33, p. 48-52.
13. N.Yuldasheva, M.Nosirov, S.Matboboeva, J.Gulomov Semi-Empirical Plasmon Coefficients of Metals for Nanoplasmonics//Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 14, No 4, 04024(3pp), 2022.