

УДК 539.1

С. В. Сахно, Е. С. Храмов, А. В. Яковец, Е. В. Сахно

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Влияние геометрической формы полупроводниковой наночастицы ИТО на чувствительность оптического плазмонного сенсора

В работе рассматривается влияние формы эллипсоидальной полупроводниковой наночастицы оксида индия-олова (indium-tin oxide – ИТО) на параметры поверхностного плазмонного резонанса, возникающего на данных наночастицах. Рассчитываются сенсорные свойства оптического плазмонного сенсора, который может быть реализован на их основе. Показано, что чувствительность подобного сенсора пропорциональна величине полуоси эллипсоида, вдоль которой направлена поляризация воздействующего излучения.

Ключевые слова: полупроводниковая наночастица, оксид индия-олова, ИТО, плазмонный резонанс, оптический плазмонный сенсор.

S. V. Sakhno, E. S. Khramov, A. V. Yakovets, E. V. Sakhno

Moscow Institute of Physics and Technology

Influence of the geometric shape of an ITO semiconductor nanoparticle on optical plasmon sensor sensitivity

The effect of the shape of an ellipsoidal semiconductor nanoparticle of indium tin oxide on parameters of surface plasmon resonance arising on these nanoparticles is considered. The sensory properties of the optical a plasmon sensor, which can be implemented on their basis, are calculated. It is shown that the sensitivity of this sensor is proportional to the semiaxis of the ellipsoid along which the incident radiation polarization is directed.

Key words: semiconductor nanoparticle, indium tin oxide, ITO, plasmon resonance, optical plasmon sensor.

1. Введение

Ранее были рассмотрены процессы поглощения и рассеяния электромагнитного излучения на полупроводниковых наночастицах сферической формы [1, 2]. На основании полученных результатов была предложена [3] модель оптического плазмонного сенсора на полупроводниковых наночастицах.

Данная работа является продолжением вышеупомянутых работ и ставит задачу обобщения модели оптического плазмонного сенсора на полупроводниковые наночастицы эллипсоидальной формы, так как предложенная ранее модель [3], является лишь частным случаем для конкретных наночастиц. Анализ литературы показал, что ранее этот вопрос не исследовался, а модель [3] показала перспективность использования полупроводниковых наночастиц в сенсорах, базирующихся на поверхностном плазмонном резонансе.

© Сахно С. В., Храмов Е. С., Яковец А. В., Сахно Е. В., 2020

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2020

2. Расчет сечения фотопоглощения

Сечение фотопоглощения найдем с помощью оптической теоремы:

$$\sigma_{abs}(\omega) = \frac{4\pi\omega\sqrt{\varepsilon_m}}{c} \text{Im}\alpha(\omega), \quad (1)$$

где ω — частота лазерного излучения, ε_m — диэлектрическая проницаемость среды, в которую помещена наночастица, c — скорость света в вакууме, $\alpha(\omega)$ — динамическая поляризуемость наночастицы.

Расчет $\alpha(\omega)$ выполняется в рамках дипольного приближения, т.е. для наночастицы, максимальный линейный размер d которой существенно меньше длины волны λ воздействующего излучения:

$$\lambda \gg 2\pi d\sqrt{\varepsilon_m}. \quad (2)$$

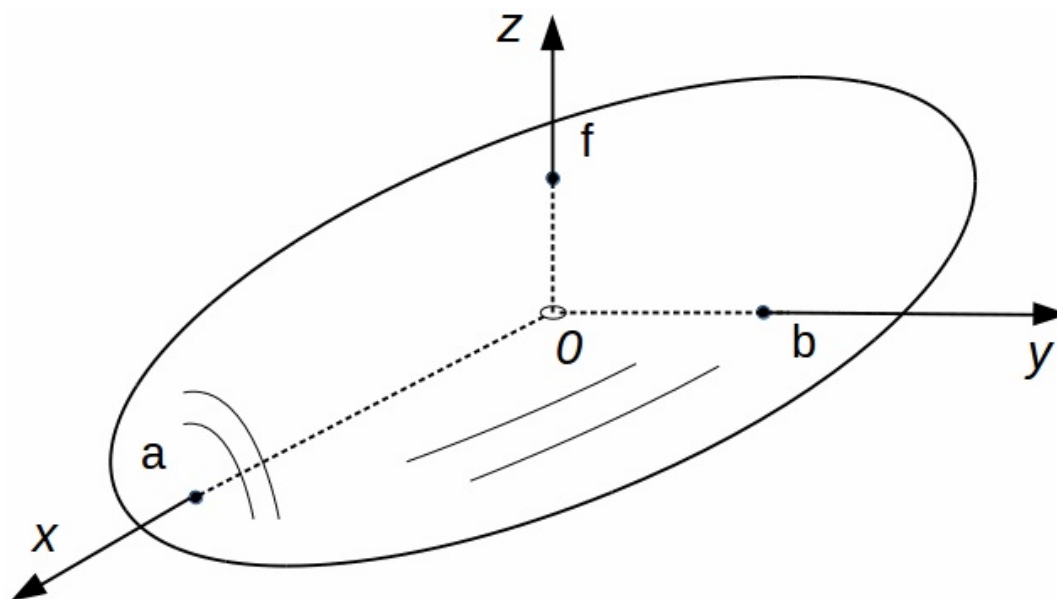


Рис. 1. Геометрия задачи

На рис. 1 приведена геометрия наночастицы эллипсоидальной формы [4]: вводится прямоугольная система координат XYZ , начало которой совпадает с геометрическим центром наночастицы, а оси Ox , Oy , Oz направлены вдоль полуосей эллипсоида a , b , f соответственно.

Предполагается, что электромагнитная волна поляризована вдоль одной из i -й оси ($i = X, Y, Z$).

Выражение для поляризуемости вдоль каждой из осей запишется следующим образом [4]:

$$\alpha_i(\omega) = abf \frac{(\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m)}{3\varepsilon_m + 3L_i(\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m)}, i = X, Y, Z, \quad (3)$$

где $\varepsilon(\omega)$ — диэлектрическая проницаемость полупроводниковой наночастицы.

Геометрические коэффициенты L_i выражаются как:

$$L_x = \frac{abf}{2} \int_0^\infty \frac{dq}{(a^2 + q)p(q)}, L_y = \frac{abf}{2} \int_0^\infty \frac{dq}{(b^2 + q)p(q)}, L_z = \frac{abf}{2} \int_0^\infty \frac{dq}{(f^2 + q)p(q)}, \quad (4)$$

где

$$p(q) = \sqrt{(q + a^2)(q + b^2)(q + f^2)},$$

$$L_x + L_y + L_z = 1.$$

Диэлектрическая проницаемость полупроводниковой мишени $\varepsilon(\omega)$ для достаточно малых частот (по сравнению с шириной запрещенной зоны рассматриваемого полупроводника) может описываться классической моделью Друде [5, 6]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (5)$$

где ε_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость вещества, γ — константа релаксации, ω_p — плазменная частота.

Входящие в (5) параметры Друде ($\varepsilon_\infty, \omega_p, \gamma$) могут быть найдены из справочной литературы или определены по кривым поглощения для интересующих типов наночастиц.

Ниже приведены результаты расчетов сечения фотопоглощения для эллипсоидальных наночастиц ИТО [7]. Рассматриваются уровни легирования оловом 8 и 10 процентов, для которых $\omega_p = 1.72$ эВ, $\gamma = 0.22$ эВ и $\omega_p = 1.89$ эВ, $\gamma = 0.15$ эВ соответственно. В обоих случаях $\varepsilon_\infty = 4.08$, диэлектрическую проницаемость среды возьмем равной единице: $\varepsilon_m = 1$.

Зададимся следующими значениями полуосей эллипсоидальной наночастицы: $a = 6$ нм, $b = 12$ нм, $f = 16$ нм.

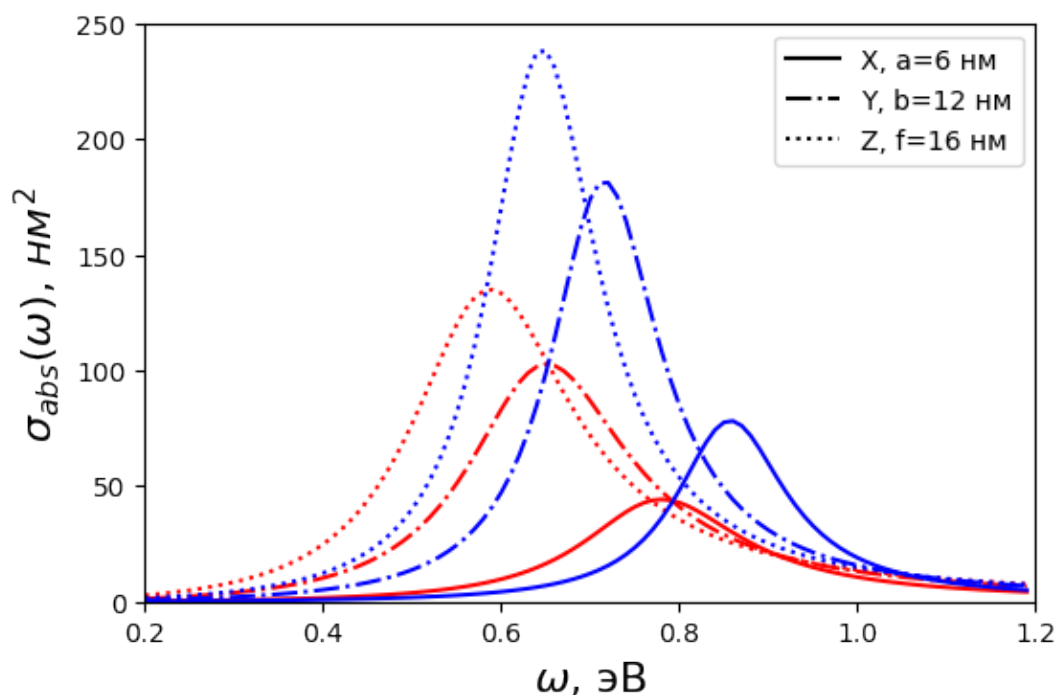


Рис. 2. Зависимость сечения фотопоглощения для наночастиц ИТО с уровнем легирования 8% (красные кривые) и 10% (синие кривые)

На графике сечений фотопоглощения на рис. 2 видны максимумы, которые соответствуют плазмонным резонансам. Для обеих наночастиц амплитуда плазмонного резонанса возрастает с увеличением длины оси, вдоль которой поляризовано излучение, а максимум плазмонного резонанса сдвигается в более низкочастотную область.

3. Расчет сенсорных свойств

Положение максимума плазмонного резонанса ω_{res} найдем из условия

$$\frac{\partial \sigma_{abs}(\omega_{res})}{\partial \omega} = 0. \quad (6)$$

Осуществив математические преобразования, получаем выражение

$$\omega_{res} = \frac{\omega_p}{\sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{1-L_i}{L_i} \varepsilon_m}}. \quad (7)$$

Выражая ω_{res} через длину волны λ_{res} и с учетом того, что $n = \sqrt{\varepsilon_m}$, получаем выражение

$$\lambda_{res} = \frac{2\pi c \sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{1-L_i}{L_i} n^2}}{\omega_p}. \quad (8)$$

Построим зависимости (8) длины волны максимума сечения фотопоглощения λ_{res} от геометрического коэффициента L_i для наночастиц ИТО.

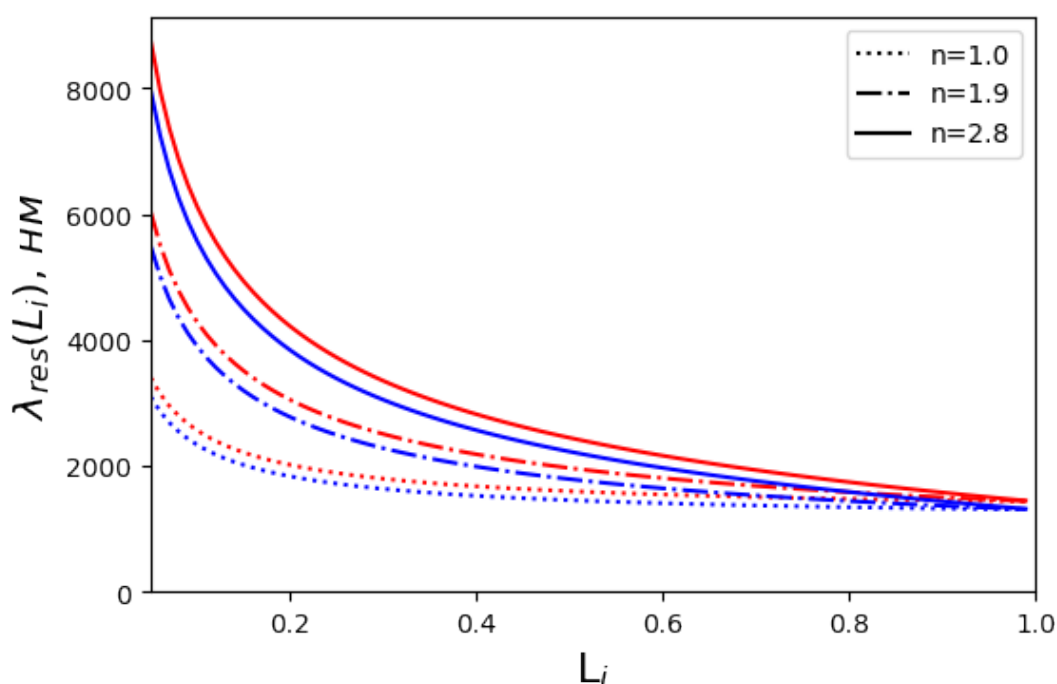


Рис. 3. Зависимость положения максимума сечения фотопоглощения от геометрического фактора L_i для наночастиц ИТО с уровнем легирования 8% (красные кривые) и 10% (синие кривые) при различных показателях преломления среды n

Из рис. 3 следует, что зависимости $\lambda_{res}(L_i)$ являются монотонно убывающими с ростом L_i , что соответствует уменьшению линейного размера наночастицы вдоль i -й оси. При равных n больший сдвиг максимума наблюдается для наночастиц ИТО с уровнем легирования 8%.

Рост показателя преломления среды n приводит к увеличению сдвига положения максимума сечения фотопоглощения для каждого вида наночастиц при фиксированном L_i . На данном эффекте основан принцип работы оптических плазмонных сенсоров, появляется возможность определять характеристики среды, в которую помещена наночастица [3].

Важной характеристикой подобного сенсора является величина сдвига положения λ_{res} при изменении показателя преломления окружающей наночастицу среды – параметр чувствительности S_λ [2], который определим следующим образом:

$$S_\lambda = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial n}. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем выражение для чувствительности оптического плазмонного сенсора на эллипсоидальной наночастице:

$$S_\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_p} \frac{1 - L_i}{L_i} \frac{n}{\sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{1 - L_i}{L_i} n^2}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что на чувствительность S_λ , помимо прочих, влияет величина параметра L_i . Исследуем влияние этого параметра на величину S_λ .

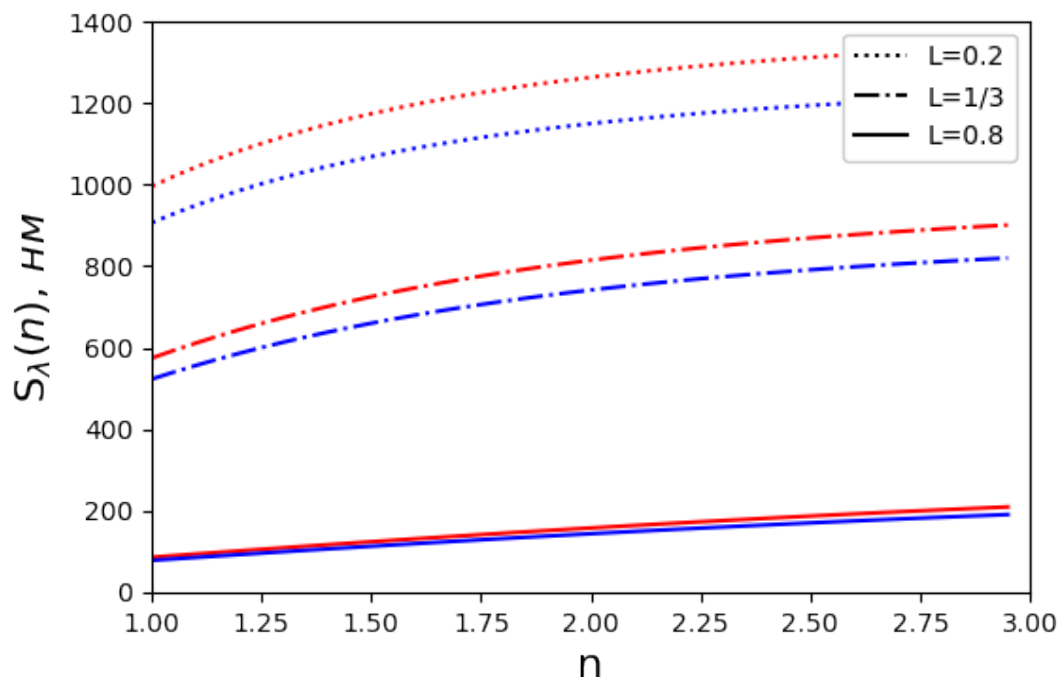


Рис. 4. Зависимость параметра чувствительности S_λ от показателя преломления окружающей среды при различных значениях параметра L_i для наночастиц ITO с уровнем легирования 8% (красные кривые) и 10% (синие кривые)

Из рис. 4 следует, что уменьшение величины параметра L_i приводит к росту параметра чувствительности S_λ , что соответствует вытягиванию наночастицы вдоль направления поляризации излучения, причем чувствительность наночастиц ITO с уровнем легирования 8%, при одном и том же L_i , выше, чем для наночастицы ITO с уровнем легирования 10%. Штрихпунктирные кривые на данном графике соответствуют сферическому случаю, когда $L_i = 1/3$.

4. Заключение

В рамках дипольного приближения выполнен расчет сечения фотопоглощения на эллипсоидальных полупроводниковых наночастицах ITO с уровнем легирования 8 и 10 процентов.

Показано, что амплитуда плазмонного резонанса возрастает с увеличением размеров наночастицы (длины полуоси эллипсоида), вдоль которой поляризовано излучение, а максимум плазмонного резонанса сдвигается в более низкочастотную область. При равных показателях преломления n больший сдвиг максимума плазмонного резонанса наблюдается для наночастиц ITO с уровнем легирования 8%.

Выполнен расчет чувствительности оптического плазмонного сенсора, который может быть построен на основе эллипсоидальных наночастиц. Установлено, что вытягивание наночастицы вдоль направления поляризации излучения приводит к росту чувствительности

сенсора, причем чувствительность для наночастицы ИТО с уровнем легирования 8%, при равных L_i , выше, чем для наночастицы ИТО с уровнем легирования 10%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00235 А.

Литература

1. Bugaev A.S., Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Yakovets A.V. Scattering of Electromagnetic Radiation by ITO Nanoparticles with Various Doping Levels // Doklady Physics. 2018. V. 63, I. 2. P. 55–57.
2. Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Yakovets A.V. Absorption of Radiation by ITO Semiconductor Nanoparticles in Plasmon Resonance Region // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2018. V. 12, I. 2. P. 325–329.
3. Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Sakhno E.V. Optical plasmon sensor based on ITO nanoparticles // Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT). 2018.
4. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. New York : John Wiley & Sons, 1983.
5. Kuttge M., Kurz H. [et al.]. Analysis of the propagation of terahertz surface plasmon polaritons on semiconductor groove gratings // J. Appl. Phys. 2007. V. 101, N 2. P. 023707.
6. West P., Ishii S. [et al.]. Searching for better plasmonic materials // Laser Photonics Rev. 2010. V. 4, N 6. P. 795–808.
7. Kanehara M., Koike H., Yoshinaga T., Teranishi T. Indium Tin Oxide Nanoparticles with Compositionally Tunable Surface Plasmon Resonance Frequencies in the Near-IR Region // J. Amer. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 17736.

References

1. Bugaev A.S., Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Yakovets A.V. Scattering of Electromagnetic Radiation by ITO Nanoparticles with Various Doping Levels. Doklady Physics. 2018. V. 63, I. 2. P. 55–57.
2. Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Yakovets A.V. Absorption of Radiation by ITO Semiconductor Nanoparticles in Plasmon Resonance Region. Russian Journal of Physical Chemistry B. 2018. V. 12, I. 2. P. 325–329.
3. Astapenko V.A., Manuilovich E.S., Sakhno S.V., Khramov E.S., Sakhno E.V. Optical plasmon sensor based on ITO nanoparticles. Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT). 2018.
4. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. New York : John Wiley & Sons, 1983.
5. Kuttge M., Kurz H., et al., Analysis of the propagation of terahertz surface plasmon polaritons on semiconductor groove gratings. J. Appl. Phys. 2007. V. 101, N 2. P. 023707.
6. West P., Ishii S., et al., Searching for better plasmonic materials. Laser Photonics Rev. 2010. V. 4, N 6. P. 795–808.
7. Kanehara M., Koike H., Yoshinaga T., Teranishi T. Indium Tin Oxide Nanoparticles with Compositionally Tunable Surface Plasmon Resonance Frequencies in the Near-IR Region. J. Amer. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 17736.