

Исследование чувствительности алюминиевого апертурного кантилевера к поляризации падающего излучения

Е.С. Козлова^{1,2}

¹Институт систем обработки
изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН;
²Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kozlova.elena.s@gmail.com

С.С. Стафеев^{1,2}

¹Институт систем обработки
изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН;
²Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
Samara, Russia
sergey.stafeev@gmail.com

В.В. Котляр^{1,2}

¹Институт систем обработки
изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН;
²Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kotlyar@ipsiras.ru

Аннотация — В этой работе мы исследовали влияние поляризации падающего излучения в процессе измерения светового поля с помощью пирамидального апертурного кантилевера. Численно показано, что рассмотренный алюминиевый пирамидальный апертурный кантилевер более чувствителен к поперечной электрической составляющей, чем к продольной.

Ключевые слова — СБОМ, пирамидальный апертурный кантилевер, поляризация, матрица Джонса, угол падения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применяя сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию (СБОМ), ученые имеют возможность измерять световые поля на границе раздела двух сред [1]. Два типа кантилеверов для измерения используются в СБОМ: апертурные и безапертурные [2]. При измерениях возникает несколько важных вопросов, например, эффект наблюдателя или оценка чувствительности кантилевера к световым полям с различными характеристиками [3-6]. В этом исследовании мы продолжаем изучение взаимодействия кантилевера и света, влияния поляризации лазерного пучка на процесс измерения алюминиевым апертурным пирамидальным кантилевером.

II. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СХЕМА

В данном исследовании рассматривался апертурный пирамидальный кантилевер из алюминия. Показатель преломления алюминия был равен $n_{Al} = 1,27 + 7,3i$. Толщина стенок рассматриваемого кантилевера составляла 67,4 нм. На вершине пирамидального кантилевера располагалась небольшая щель размером 0,1 мкм. Излучение падало под некоторым углом α к кантилеверу. Расстояние от плоскости источника до острия зонда равнялось 1 мкм. Все излучение, прошедшее через маленькое отверстие в верхней части кантилевера, фиксировалось специальным монитором, размещенным внутри кантилевера. На рис. 1 показана схема моделирования.

В этом исследовании мы предложили линейно поляризованный Гауссов пучок в качестве падающего света. Компоненты исходного светового поля вычислялись в MATLAB с использованием следующего выражения:

$$\begin{cases} E_x(r, \theta) = \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right); \\ E_y(r, \theta) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где E_x и E_y – компоненты электрического поля, (r, θ) – полярные координаты, ω – радиус перетяжки. Длина волны была равна $\lambda = 532$ нм.

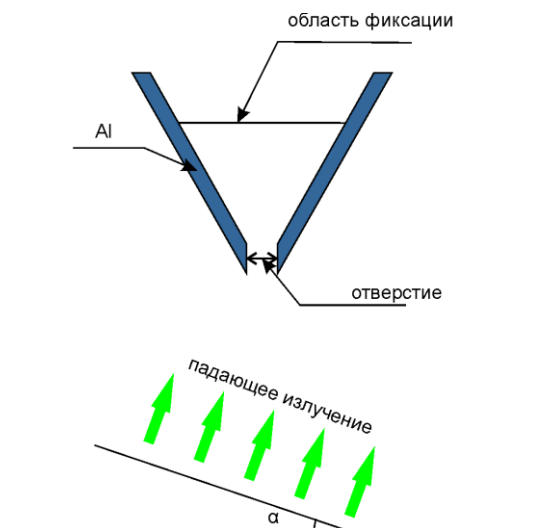


Рис. 1. Схема моделирования

Численное моделирование выполнено в программе FullWAVE, основанной на методе конечных разностей во временной области (метод FDTD). Размер пространственной сетки – 15 нм, псевдовременной шаг ($\tau = ct$, c – скорость света, t – время) – 7,5 нм. После моделирования в FullWAVE все полученные результаты были усреднены. В каждой серии численных экспериментов анализировалась суммарная измеренная интенсивность I_{tot} , рассчитываемая как сумма значений интенсивности в каждой точке области фиксации.

III. ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО УГЛА

В этом разделе мы исследовали влияние угла поляризации падающего излучения на процесс измерения. Вращение угла поляризации осуществлялось с помощью специальных опций в программе FullWAVE через матрицу Джонса:

$$T = \text{sign}(\cos \theta) \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Мы моделировали распространение падающего светового поля, вращаемого матрицей Джонса, и его фиксацию предложенным кантилевером. Полярный угол изменялся от 0 до 180 градусов с шагом $\Delta\theta = 5^\circ$. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

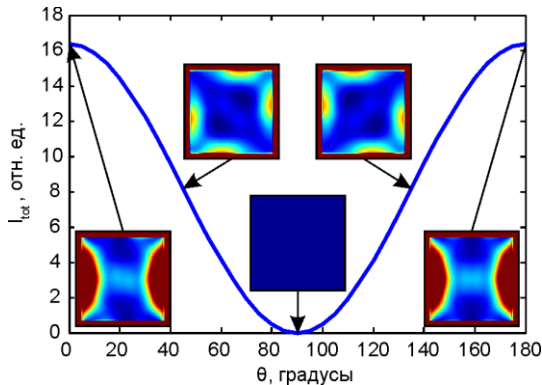


Рис. 2. Зависимость полной измеренной интенсивности от угла поляризации

Следует отметить, что интенсивность, которая пройдет через поляризатор, описываемый выражением (2), будет разной. Если мы рассчитаем полную интенсивность для некоторых стандартных углов:

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ &\Rightarrow I_{tot} = |E_x|^2, \\ \theta = 45^\circ &\Rightarrow I_{tot} = |E_x|^2 / 2, \\ \theta = 90^\circ &\Rightarrow I_{tot} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

то увидим, что общая измеренная интенсивность имеет зависимость от угла и совпадает с результатами, полученными при численном моделировании. Рис. 2 подтверждает, что кантилевер может измерять поперечные компоненты без потерь.

IV. ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ

В этом разделе мы исследовали влияние угла падения α (рис. 1) на процесс измерения. Угол α изменялся от 0 до 45 градусов с шагом $\Delta\alpha = 1^\circ$. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что угол падения α оказывает большое влияние на процесс измерения. При угле падения 15 градусов регистрируемая интенсивность падает на 15%, а при 40 градусах на 41%. Падение фиксируемой интенсивности в практически пропорциональна углу падения. Однако, наблюдается незначительное увеличение значения фиксированной суммарной интенсивности при α в диапазоне 20° - 25° . При падении света на кантилевер под углом α (рис. 1) возникает продольная составляющая. Причем продольная составляющая тем больше, чем больше угол падения. Таким образом, можно сделать вывод, что алюминиевый апертурный пирамидальный кантилевер невосприимчив к продольной составляющей электрического поля.

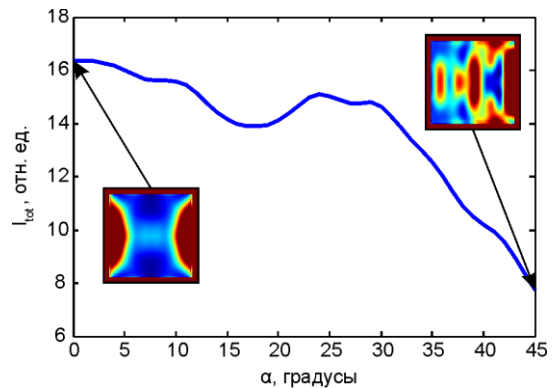


Рис. 3. Зависимость полной измеренной интенсивности от угла падения

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашем исследовании мы промоделировали процесс измерения светового поля с помощью полого алюминиевого кантилевера (рис. 1). В качестве падающего излучения мы рассмотрели линейно поляризованный Гауссов пучок с длиной волны 532 нм. Численно показано, что поворот угла поляризации в поперечной плоскости не влияет на процесс измерения. Однако угол падения излучения существенно влияет на характеристики полого алюминиевого кантилевера. При угле падения 15 градусов регистрируемая интенсивность падает на 15%, а при 40 градусах на 41%. Величина уменьшения пропорциональна углу. Показано, что рассматриваемый кантилевер невосприимчив к продольной составляющей электрического поля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00137) в частях «Влияние угла падения», а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Введение».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abed, J. Investigation of Broadband Surface Plasmon Resonance of Dewetted Au Structures on TiO2 by Aperture-Probe SNOM and FDTD Simulations / J. Abed, F. Alexander, I. Taha, N. Rajput, C. Aubry, M. Jouiad // Plasmonics. – 2019. – Vol.14. – P. 205–218. DOI: 10.1007/s11468-018-0794-3.
- [2] Kassing, R. Sensors for scanning probe microscopy / R. Kassing, I. Rangelow, E. Oesterschulze, M. Stuke // Appl. Phys. A. – 2003. – Vol. 76. – P. 907–911. DOI: 10.1007/s00339-002-1974-7.
- [3] Mikhailova, T.V. Light polarisation and intensity behaviour in aperture cantilevers with carbon tip created by focused ion beam / T.V. Mikhailova, Y.E. Vysokikh, S.Y. Krasnoborodko, A.S. Kolomytsev, A.A. Fedotov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 699. – P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/699/1/012030.
- [4] Werner, S. Cantilever probes with aperture tips for polarisation-sensitive scanning near-field optical microscopy / S. Werner, O. Rudow, C. Mihalcea, E. Oesterschulze // Appl. Phys. A. – 1998. – Vol. 66. – P. S367-S370. DOI: 10.1007/s003390051165.
- [5] Biagioni, P. Unexpected polarisation behavior at the aperture of hollow-pyramid near-field probes / P. Biagioni, D. Polli // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 87(22). – P. 223112. DOI: 10.1063/1.2137891.
- [6] Biagioni, P. Near-field vs. far-field polarisation properties of hollow pyramid SNOM tips / P. Biagioni, M. Coduri, D. Polli, T. Virgili, M. Labardi, G. Cerullo, M. Finazzi, L. Duò // Phys. status solidi. – 2005. – Vol. 2(12). – P. 4078–4082. DOI: 10.1002/pssc.200562206.