

Исследование влияния алюминиевого кантилевера на поляризацию светового поля

Е.С. Козлова

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН

Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kozlova.elena.s@gmail.com

С.С. Стафеев

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН

Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
sergey.stafeev@gmail.com

В.В. Котляр

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН

Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kotlyar@ipsiras.ru

Аннотация—В этой статье с использованием метода конечных разностей во временной области исследуется влияние пирамидального апертурного кантилевера на измерение поляризации светового поля. Показано, что алюминиевый кантилевер оказывает сильное влияние на ТЕ-поляризованную волну, в то время как для цилиндрического векторного пучка изменения поляризации не столь значительны.

Ключевые слова— пирамидальный апертурный кантилевер, поляризация, СБОМ.

1. ВВЕДЕНИЕ

С помощью сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) исследователи имеют возможность обнаруживать световые поля вблизи границ раздела двух сред, где классическая оптическая микроскопия бессильна [1-2]. Существует два типа кантилеверов для регистрации излучения в СБОМ: безапертурные и апертурные [3-10]. В последнее время наблюдается устойчивый рост использования безапертурных СБОМ [3,4]. Однако апертурные СБОМ [5,6] по-прежнему востребованы из-за большой сложности измерений безапертурными методами СБОМ. Кроме того, ведутся активные исследования в области применимости того или иного типа кантилеверов для различных задач, а также оптимизации процесса измерения с их помощью [7].

Ранее мы изучали фокусировку цилиндрического векторного пучка (ЦВП) второго порядка амплитудной зонной пластинкой Френеля с использованием СБОМ [8]. В ходе экспериментальных исследований были получены косвенные доказательства чувствительности кантилевера к поперечной составляющей напряженности светового поля в области обратного потока. Однако оставалось неясным, как кантилевер СБОМ повлияет на область обратного потока энергии. Здесь мы представляем исследование влияния пирамидального алюминиевого апертурного кантилевера на поляризацию лазерного пучка.

2. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим пирамидальный апертурный кантилевер из алюминия (показатель преломления $n = 1,27 + 7,3i$), с толщиной стенки 67,4 нм и щелью шириной 100 нм на конце. Исходный пучок падал под нормальным углом к кантилеверу. Наконечник зонда располагался на расстоянии 1 мкм от источника. После прохождения

через наноотверстие зонда световое поле регистрировалось специальным монитором, расположенным в зонде. В качестве падающего света рассматривались плоская волна с линейной поляризацией (ТЕ-пучок) и ЦВП второго порядка [9]. Длина волны равнялась $\lambda = 532$ нм. Численное моделирование было выполнено с использованием пакета FullWAVE, в котором реализован метод конечных разностей во временной области (FDTD-метод), на сетке с пространственным шагом 15 нм, шагом по псевдовремени ($\tau = ct$, c – скорость света, t – время) 7,5 нм. Распределение падающего поля для ЦВП было рассчитано в пакете MATLAB, а ТЕ-волна задавалась специальными средствами в пакете FullWAVE. Для расчета амплитуды и фазы полученных полей использовались авторские подпрограммы MATLAB, основанные на методе из [10].

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ТЕ-ВОЛНЫ

В первой части экспериментов моделировалось распространение линейно поляризованного. На рис. 1-2 показаны рассчитанные амплитуда и фаза компонент электромагнитного поля.

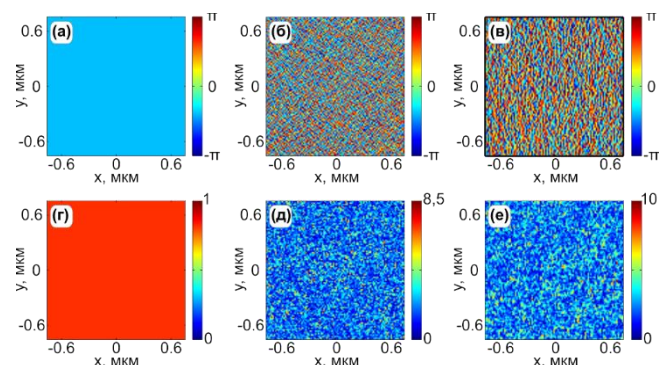


Рис. 1. Фаза (а-в) и амплитуда (г-е) ТЕ-волны без кантилевера: E_x (а,б), E_y (в,г), E_z (д,е)

Из рис. 1 видно, что поле плоскополяризовано вдоль оси абсцисс, а остальные компоненты представляют собой белый шум (т.е. отсутствуют). Шум можно объяснить особенностью метода вычисления амплитуды и фазы по выходным данным пакета программ FullWAVE, рассчитывающего распределения компонент электромагнитного поля в каждый момент времени.

Из рис. 3 видно, что поле в области фиксации значительно изменило свою поляризацию. Все три

компоненты присутствуют в поле. Поляризация луча напоминает ЦВП, представленный в следующем разделе.

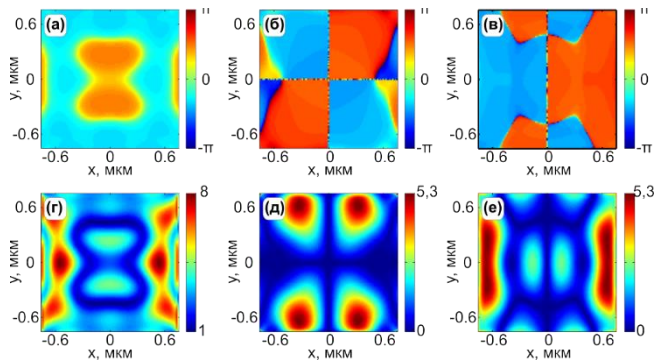


Рис. 2. Фаза (а-в) и амплитуда (г-е) ТЕ-волны, измеренные кантилевером: E_x (а,б), E_y (в,г), E_z (д,е)

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЦВП

В этом разделе мы провели аналогичный численный эксперимент, но для ЦВП второго порядка. На рис. 3-4 показаны результаты.

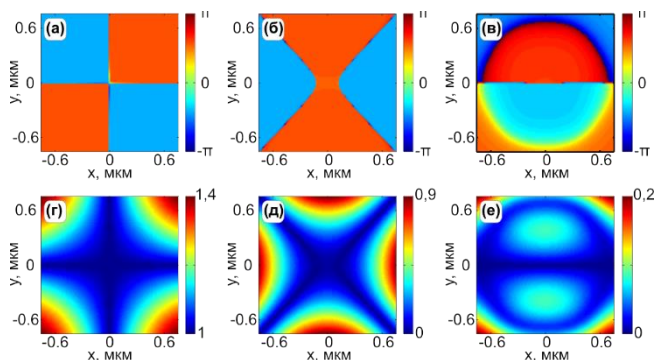


Рис. 3. Фаза (а-в) и амплитуда (г-е) ЦВП без кантилевера: E_x (а,б), E_y (в,г), E_z (д,е)

Из рис. 3 видно, что в процессе распространения пучка поляризация менялась незначительно. Появилась компонента z .

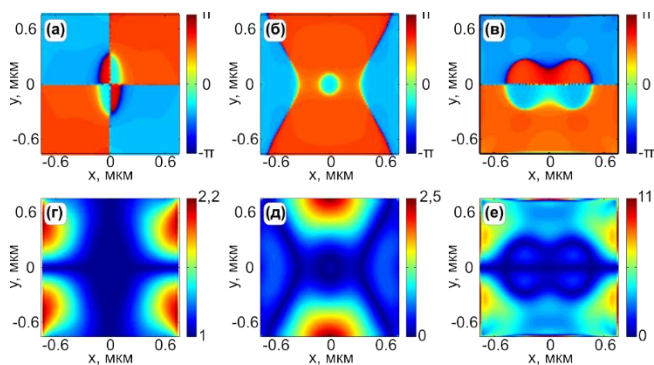


Рис. 4. Фаза (а-в) и амплитуда (г-е) ЦВП, измеренная кантилевером: E_x (а,б), E_y (в,г), E_z (д,е)

Из рис. 4 видно, что поле также изменило свою поляризацию, но не так существенно, как для ТЕ-волны.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено FDTD-моделирование распространения лазерного луча и его измерения с использованием полого алюминиевого кантилевера с отверстием шириной 100 нм. В качестве исходного пучка рассматривались ТЕ-волна и ЦВП 2-го порядка. Показано, что алюминиевый кантилевер оказывает существенное влияние на ТЕ-поляризованную волну, в то время как для ЦВП изменения поляризации не столь значительны. Полученные результаты можно объяснить возбуждением плазмонов на краях щели кантилевера, а также отражением света от внутренних краев кантилевера. Оба этих эффекта существенно влияют на конечное распределение поля в зоне фиксации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в частях «Численное моделирование для ТЕ-волны» и «Численное моделирование для ЦВП», а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Параметры моделирования».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pohl, D.W. Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM) / D.W. Pohl // Advances in Optical and Electron Microscopy. – 1991. – Vol. 12. – P. 243-312. DOI: 10.1016/B978-0-12-029912-6.50009-9.
- [2] Bazylewski, P. A Review of Three-Dimensional Scanning Near-Field Optical Microscopy (3D-SNOM) and Its Applications in Nanoscale Light Management / P. Bazylewski, S. Ezugwu, G. Fanchini // Appl. Sci. – 2017. – Vol. 7(10). – P. 973. DOI: 10.3390/app7100973.
- [3] Huber, Ch. Laser-induced cantilever behaviour in apertureless scanning near-field optical microscopy / Ch. Huber, Ye. Prior, W. Kautek // Meas. Sci. Technol. – 2014. – Vol. 25(7). – P. 075604. DOI: 10.1088/0957-0233/25/7/075604.
- [4] Baba, Yu. Measurement of polarization properties of fifth harmonic signals in apertureless-type scanning near-field optical microscopy / Yu. Baba, I. Matsuya, M. Nishikawa, T. Ishibashi // Jpn. J. Appl. Phys. – 2018. – Vol. 57(9S2). – P. 09TC04. DOI: 10.7567/JJAP.57.09TC04.
- [5] Vysokikh, Yu.E. Carbon tip aperture cantilevers: Fabrication & features in near-field magneto-optical imaging / Yu.E. Vysokikh, T.V. Mikhailova, S.Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomyitsev, O.I. Ilin, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, V.I. Shevyakov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – Vol. 259. – P. 167837. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167837.
- [6] Keplinger, T. Analyzing Plant Cell Wall Ultrastructure by Scanning Near-Field Optical Microscopy (SNOM) / T. Keplinger, I. Burgert // The Plant Cell Wall. Methods in Molecular Biology. – 2020. – Vol. 2149. – P. 239-249. DOI: 10.1007/978-1-0716-0621-6_14.
- [7] Kim, H. A Concept of Cantilevers Optical Dimension for Optimal Application to Cantilever-Based Near-Field Scanning Optical Microscope and Its Measurement / H. Kim, S.W. Choi, M. Jang, D.J. Park // J. Korean Phys. Soc. – 2019. – Vol. 74. – P. 637-641. DOI: 10.3938/jkps.74.637.
- [8] Kotlyar, V.V. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // Appl. Opt. – 2013. – Vol. 52(3). – P. 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- [9] Kozlova, E.S. Transverse intensity at the tight focus of a second-order cylindrical vector beam / E.S. Kozlova, S.S. Stafeev, S.A. Fomchenkov, V.V. Podlipnov, V.V. Kotlyar // Computer Optics. – 2021. – Vol. 45(2). – P. 165-171. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-835.
- [10] Soifer, V. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / V. Soifer. – NY: John Wiley and Sons, 2002. – 784 p.