

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО МИКРОСКОПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОЙ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Хонина С. Н., Алфёров С. В., Карпеев С. В., Моисеев О. Ю.
Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения компонент электрического поля в фокальной плоскости при вращении пластинки с фазовым скачком величиной π , помещённой в фокусируемый пучок. На основе сравнения теоретических и экспериментальных результатов проведён анализ поляризационной чувствительности различных апертурных металлизированных зондов. Показано, что с ростом диаметра открытой части заострённого конца зонда происходит существенное перераспределение чувствительности в пользу поперечных компонент электрического поля и рост коэффициента передачи сигнала через зонд.

Ключевые слова: острая фокусировка, пластинка с фазовым скачком, компоненты электрического поля, ближнепольный сканирующий микроскоп, металлизированные апертурные зонды.

Введение

Субволновая локализация электромагнитного излучения существенно связана, как правило, с его поляризационными свойствами и требует специальных методов измерения распределения интенсивности. Все используемые в настоящее время методы связаны с механическим сканированием в области измерений с субволновым шагом, что стало возможным благодаря появлению соответствующих микромеханических устройств. Условно можно выделить 4 группы методов, различающихся принципами измерения интенсивности:

1. Методы, основанные на флюоресценции молекул с дипольным моментом [1]. В зависимости от ориентации молекулы, она обладает чувствительностью к разным компонентам электромагнитного поля. Метод скорее пригоден для определения ориентации молекул в известном и специально сформированном поле [2], а не для измерения интенсивности. В качестве недостатков следует также отметить сложность метода в целом (обусловлена сложностью приготовления образца и наличием спектральных фильтров, которые снижают и без того низкую чувствительность), а также трудность воспроизведения результатов, когда речь идёт об измерении интенсивности. Это происходит из-за случайности положения центров и ориентации молекул в трёхмерном пространстве, наличия близкорасположенных молекул с разной ориентацией и т.п. При использовании метода невозможно точно определить положение молекулы по оси z из-за конечной толщины слоя, в котором расположены молекулы.

2. Методы, основанные на применении оптического ножа [3, 4]. Непрозрачный слой в виде полуплоскости наносится непосредственно на фотоприёмный слой. Достоинства метода – относительная простота и отсутствие зависимости чувствительности от поляризации (хотя для ряда применений это скорее недостаток). Однако метод является простым только для радиально симметричных распределений. В случае отсутствия радиальной симметрии требуется проводить сканирование не только линейным перемещением ножа, но и по углу, а затем проводить обработку результатов. Если в распределении, кроме интенсивных центральных пиков, присутствуют ещё какие-то локальные макси-

мумы, сравнимые по полной энергии с центральными (как, например, в бесселевых пучках), то на фоне суммарной интенсивности изменения при сканировании становятся весьма малыми, что приводит к снижению динамического диапазона измерений.

3. Несколько особняком стоит метод, основанный на предварительной записи фокального распределения в виде рельефа на фоторезист [5] с последующим сканированием на атомно-силовом микроскопе. При этом наводка на резкость осуществляется при помощи ножа в виде плёнки хрома, напылённой на часть поверхности фоторезиста. Метод одинаково чувствителен ко всем компонентам поля. Недостатком является интегрирование интенсивности по толщине плёнки фоторезиста, что также снижает потенциальную разрешающую способность метода.

4. Наиболее распространены методы, основанные на применении ближнепольных сканирующих оптических микроскопов (БСОМ) [6, 7] с апертурными [8–11] и безапертурными [12–14] зондами. Применяются апертурные зонды в виде волоконных световодов с заострённым металлизированным концом [8–10] либо в виде пустотелых кантилеверов, выполненных на балке [11]. В первом случае попавшее в световод излучение далее детектируется при помощи фотоумножителя, поскольку коэффициенты передачи таких зондов весьма малы (порядка 10^{-4}). Во втором случае прошедший через кантилевер свет собирается при помощи высокоапертурного объектива. Для апертурных металлизированных волоконных зондов характерна селективная чувствительностью к различным компонентам электрического поля. Причём теоретически она пропорциональна производной от продольной компоненты [9, 10], хотя, как показано в работе [8], с достаточной точностью можно считать её в виде взвешенной суммы продольной и поперечной компонент. Селективная чувствительность проявляется и для зондов второго типа, однако в этом случае, как показано теоретически и экспериментально [11], присутствует чувствительность только к поперечным компонентам. Также следует отметить, что конфигурация ближнепольного микроскопа, в которой предлагается такой зонд, имеет подвижную платформу только для исследуемого образца, что исключает возможность исследования рас-

пределений интенсивности, создаваемых при статическом освещении образца на просвет.

Подводя итог, можно сказать, что наиболее универсальным средством исследования распределений интенсивности электромагнитного излучения с субволновым разрешением является метод ближнепольной микроскопии с апертурным металлизированным волоконным зондом, однако в условиях недостаточной определённости объекта исследования его необходимо дополнять методом исследования с другим распределением чувствительности по компонентам электромагнитного поля.

При этом остаётся открытым вопрос: что именно и в каком соотношении измеряется в ближнепольном микроскопе с апертурным металлизированным волоконным зондом. В данной работе мы используем такой микроскоп для измерения распределений интенсивности в фокальной плоскости при различном распределении поперечных и продольной компонент электрического поля. Динамическое изменение фокальной картины можно обеспечить простым вращением пластинки с фазовым скачком величиной π , расположенной перед фокусирующим объективом.

Использование фазового сдвига, соответствующего высшей моде Эрмита–Гаусса, для возбуждения в центре фокуса продольной компоненты электрического поля было рассмотрено в [15].

В работе [16] было показано, что фокальная картина и, соответственно, вклад продольной компоненты в центральную часть фокальной области зависит от взаимного расположения оси поляризации и линии фазового скачка пластины. При их ортогональном положении обеспечивается максимальное содержание продольной компоненты в фокусе, а при совпадении осей – минимальное. Таким образом, вращение фазовой пластинки позволяет динамически менять фокальную картину и распределение компонент электрического поля. При этом (в отличие от изменения, например, типа поляризации) никаких других изменений в условиях эксперимента не происходит, что даёт уникальную возможность достоверного сравнения теоретических и экспериментальных распределений интенсивности с разными соотношениями компонент электрического поля.

Эта возможность используется в данной работе для анализа поляризационной чувствительности различных апертурных металлизированных зондов.

1. Численное моделирование

Для моделирования фокусировки лазерного излучения была использована модель апланатического объектива в приближении Дебая [17, 18].

В табл. 1 приведены результаты моделирования фокусировки равномерного излучения с линейной у-поляризацией с помощью апланатического объектива с числовой апертурой $NA=0,8$. В первом столбце показано положение фазовой пластинки с линейным скачком по отношению к вертикальной оси поляризации. Изменение положения пластинки достигается простым вращением в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

Различные источники сообщают об экспериментальном измерении с помощью БСОМ с апертурными зондами различных характеристик. Так, в работе [8] сообщается о преимущественном измерении продольной компоненты, в работах [9, 10] указывается на измерение градиента от продольной компоненты, а в [11] утверждается возможность измерения только поперечных компонент.

Таким образом, ситуация неоднозначная и требует прояснения. Чтобы выполнить сравнение экспериментальных результатов с теоретическими, в табл. 1 приведены различные характеристики электрического поля. Распределения показаны в фокальной плоскости в центральной области размером $3\lambda \times 3\lambda$.

Во втором столбце табл. 1 приведена равномерно взвешенная сумма интенсивностей всех компонент электрического поля. В третьем столбце – сумма поперечных компонент, в четвёртом – продольная компонента, а в пятом – интенсивность градиента продольной компоненты.

Как видно из распределений, приведённых во втором столбце, в условиях числовой апертуры $NA=0,8$ продольная компонента выражена слабо на фоне поперечных компонент. Поэтому регистрация распределений, соответствующих четвёртому столбцу, будет означать избирательную чувствительность используемого зонда именно к продольной компоненте.

Для усиления вклада продольной компоненты в фокальной области можно блокировать центральную часть объектива. При этом общая интенсивность уменьшится пропорционально площади закрытого участка.

В табл. 2 приведено распределение равномерно взвешенной суммы компонент электрического поля $|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$ при блокировке центральной части объектива радиусом $0,6R$, R – радиус апертуры объектива. Как видно из приведённых результатов, фокальное пятно уменьшается в размерах и становятся заметными боковые лепестки. Это связано с кольцевой аподизацией пропускной функции объектива, которая приводит к формированию в фокусе распределения, пропорционального функции Бесселя нулевого порядка, вместо картины Эйри. В этом случае увеличение вклада продольной компоненты становится заметнее при перпендикулярной ориентации фазовой пластики к оси поляризации.

2. Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментального исследования была изготовлена фазовая пластинка со ступенькой, обеспечивающей необходимый фазовый сдвиг на π . Расчётная высота ступеньки на кварце с показателем преломления $n=1,49$ составляет 646 нм для гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda=632,8$ нм. Ступенька высотой 650 нм была получена фотолитографическим способом с использованием жидкостного травления. На рис. 1 приведена профилограмма полученной ступеньки. Погрешность изготовления 4 нм является очень низкой и не влияет на результаты эксперимента.

Таблица 1. Распределение различных компонент электрического поля в фокальной плоскости (негатив) при использовании апланатического объектива с $NA = 0,8$, освещённого равномерным излучением с линейной у-поляризацией

Фазовая функция пропускания	Поперечное распределение в фокусе ($3\lambda \times 3\lambda$) $y \uparrow, x \rightarrow$			
	$ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$	$ E_x ^2 + E_y ^2$	$ E_z ^2$	$ \nabla_{\perp} E_z ^2$

Таблица 2. Распределение равномерно-взвешенной суммы компонент электрического поля $|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$ (негатив) в фокальной плоскости при использовании апланатического объектива с $NA = 0,8$ с закрытой центральной частью

Фазовая функция пропускания				
Поперечное распределение в фокусе ($3\lambda \times 3\lambda$) $y \uparrow, x \rightarrow$				

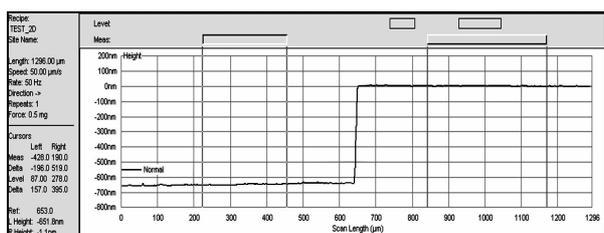


Рис. 1. Профилограмма ступеньки на кварце

В работе были проведены две серии экспериментов, отличающиеся применявшимися зондами для ближнепольной микроскопии. В первой серии использовался стандартный апертурный металлизированный БСОМ-зонд производства NT-MDT. Вторая серия экспериментов проводилась также с металлизированным апертурным зондом, но бывшим длительное время в употреблении.

На рис. 2а, б приведён вид стандартного зонда (взяты с сайта производителя), а на рис. 2в – после длительного использования (получен авторами на электронном микроскопе). Заявляемый производителем диаметр апертурного отверстия нового зонда составляет 50–100 нм, что подтверждается рис. 2б. Как видно из рис. 2в, кончик бывшего в употреблении зонда со временем разрушается и апертурное отверстие становится значительно больше. Хотя специальные измерения не проводились, но на практике замечено, что коэффициент передачи таких зондов по сравнению с новыми значительно возрастает. Кроме разрушения острия зонда, приводящего к увеличению его диаметра, это связано, по-видимому, и с деградацией металлического напыления от воздействия различных факторов, одним из которых, по нашим наблюдениям, является воздействие когерентного излучения.

Заявляемый производителем коэффициент передачи сигнала нового зонда составляет порядка 10^{-5} . Низкий коэффициент передачи требует подачи высокого напряжения на ФЭУ. Так, в первой серии экспериментов с новым зондом напряжение было не менее 1200 В, а сигнал всё равно был сильно зашумлён, а при использовании старого зонда для получения уверенного сигнала достаточно было подать напряжение 300 В. Нами было сделано предположение, что и поляризационная чувствительность зонда в процессе эксплуатации претерпевает изменения, а именно: происходит её перераспределение в пользу распространяющихся поперечных компонент.

Измерения проводились по схеме, описанной в [19]. Дополнительно на отдельной юстируемой подвижке непосредственно перед фокусирующим объективом выставлялась пластинка с фазовым скачком. При необходимости дополнительно выставлялась блокирующая центральная диафрагма.

Результаты измерения интенсивности в фокальной картине, полученные с использованием нового зонда, приведены на рис. 3. Сравнение их с теоретическими результатами не оставляет сомнений, что основной вклад в измеренную интенсивность даёт продольная компонента электрического поля. Низкий коэффициент передачи зонда приводит к высокому уровню шумов на зарегистрированных распределениях.

Вторая серия экспериментов проводилась с зондом, показанным на рис. 2в. Поскольку чувствительность такого зонда возрастает, появляется возможность закрыть центральную часть объектива диафрагмой, что в соответствии с теорией должно приводить к более острой фокусировке, правда, с потерей энергии. В эксперименте для объектива диаметром 6 мм применялась блокирующая центральная диафрагма диаметром 4 мм.

Сравнение результатов второй серии (показано на рис. 4) с теорией свидетельствует о преобладании вклада поперечных компонент, что подтверждает сделанное предположение о существенной зависимости поляризационных свойств ближнепольных зондов от геометрии их заострённой части. Очевидно, что с ростом диаметра заострённого конца зонда происходит существенное пе-

рераспределение чувствительности в пользу поперечных компонент. Кроме того, больший коэффициент передачи сигнала такого зонда приводит к меньшему уровню шумов на распределениях рис. 4 по сравнению с рис. 3. Уменьшение размеров фокального пятна при одновременном росте боковых лепестков в случае использования кольцевой апертуры также хорошо заметно на рис. 4.

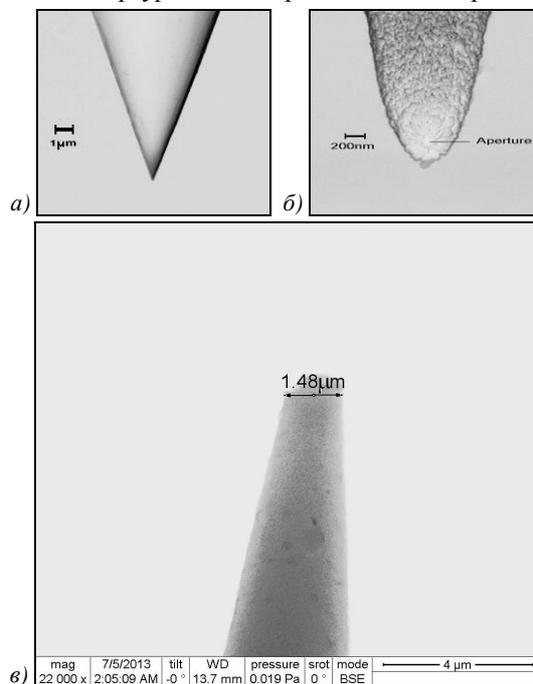


Рис. 2. Вид стандартного металлизированного апертурного зонда без металлической оболочки (а) и после покрытия металлом (б), а также вид зонда после длительного использования (в)

Заключение

Проведены исследования распределений интенсивности электрического поля в фокальной картине острого фокусированного пучка при помощи ближнепольного микроскопа с апертурным металлизированным волоконным зондом. В процессе измерений осуществлялось вращение кварцевой пластинки с фазовым скачком величиной π , помещённой в фокусируемый пучок.

Исследование проводилось зондами с различной степенью износа. Полученные результаты позволяют сделать вывод о существенном влиянии степени износа зонда на поляризационную чувствительность и коэффициент передачи сигнала. Так, с ростом диаметра заострённого конца зонда происходит существенное перераспределение чувствительности в пользу поперечных компонент электрического поля и рост коэффициента передачи сигнала зондом.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 13-07-00266 и 13-07-97004-р_поволжье_a) и Министерства образования и науки Российской Федерации, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

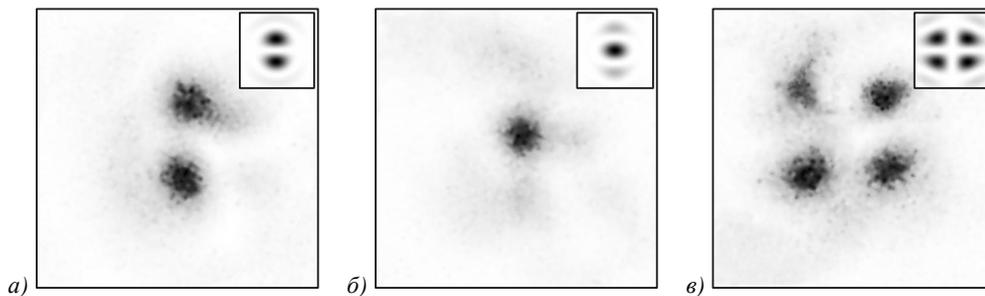


Рис. 3. Картины, полученные с помощью ближнепольного микроскопа (4 мкм \times 4 мкм) с использованием стандартного зонда: в отсутствие фазовой пластинки (а), при расположении фазового скачка перпендикулярно оси поляризации (б), при расположении фазового скачка параллельно оси поляризации (в) (на врезках для сравнения приведены теоретические распределения, соответствующие сделанным в тексте выводам)

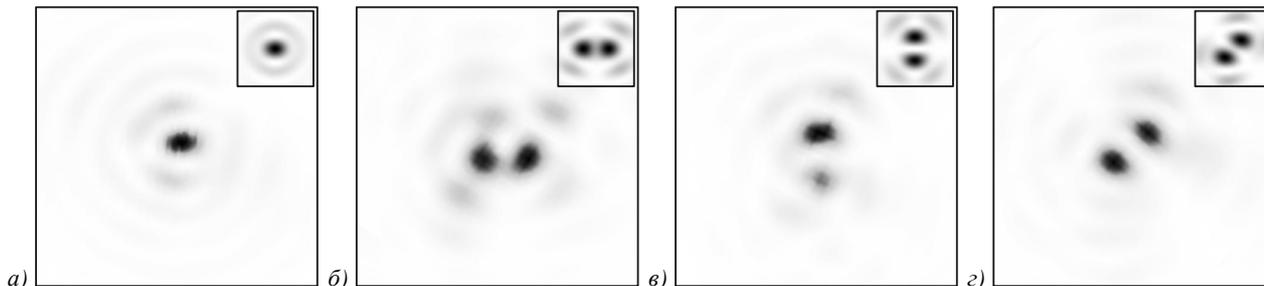


Рис. 4. Картины, полученные с помощью ближнепольного микроскопа (4 мкм \times 4 мкм) с использованием зонда с увеличенным отверстием: в отсутствие фазовой пластинки (а), при расположении фазового скачка перпендикулярно оси поляризации (б), при расположении фазового скачка параллельно оси поляризации (в), при расположении фазового скачка под углом 45° к оси поляризации (г) (на врезках для сравнения приведены теоретические распределения, соответствующие сделанным в тексте выводам)

Литература (References)

1. **Novotny, L.** Longitudinal field modes probed by single molecules / L. Novotny, M.R. Beversluis, K.S. Youngworth, and T.G. Brown // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86, N 23. – P. 5251-5254.
2. **Xie, X.S.** Probing single molecule dynamics / X.S. Xie and R.C. Dunn // *Science.* – 1994. – V. 265. – P. 361-364.
3. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis and G. Leuchs // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V. 91. – P. 233901.
4. **Kitamura, K.** Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam / K. Kitamura, K. Sakai and S. Noda // *Opt. Express.* – 2010. – V. 18, N 5. – P. 4518-4525.
5. **Hao, B.** Experimental measurement of longitudinal component in the vicinity of focused radially polarized beam / B. Hao and J. Leger // *Opt. Express.* – 2007. – V. 15, N 6. – P. 3550-3556.
6. **Novotny, L.** Longitudinal field modes probed by single molecules / L. Novotny, S.J. Stranick // *Annu. Rev. Phys. Chem.* – 2006. – V. 57. – P. 303-331.
7. **Wang, J.** Development and prospect of near-field optical measurements and characterizations / J. Wang, Q. Wang, M. Zhang // *Front. Optoelectron.* – 2012. – V. 5, N 2. – P. 171-181.
8. **Jia, B.** Direct observation of a pure focused evanescent field of a high numerical aperture objective lens by scanning near-field optical microscopy / B. Jia, X. Gan and M. Gu // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – V. 86. – P. 131110.
9. **Bouhelier, A.** Surface plasmon interference excited by tightly focused laser beams / A. Bouhelier, F. Ignatovich, A. Bruyant, C. Huang, G. Colas des Francs, J.-C. Weeber, A. Dereux, G.P. Wiederrecht and L. Novotny // *Opt. Lett.* – 2007. – V. 32, N 17. – P. 2535-2537.
10. **Chen, W.** Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam / W. Chen and Q. Zhan // *Opt. Lett.* – 2009. – V. 34, N 6. – P. 722-724.
11. **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 and A.A. Kovalev // *Appl. Opt.* – 2013. – V. 52, N 3. – P. 330-339.
12. **Zayats, A.V.** Apertureless near-field optical microscopy via local second-harmonic generation / A.V. Zayats, V. Sandoghdar // *J. Microscopy.* – 2001. – V. 202. – P. 94-99.
13. **Bouhelier, A.** Near-field scattering of longitudinal fields / A. Bouhelier, M.R. Beversluis and L. Novotny // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – V. 82(25). – P. 4596-4598.
14. **Descrovi, E.** Optical properties of microfabricated fully-metal-coated near-field probes in collection mode / E. Descrovi, L. Vaccaro, L. Aeschmann, W. Nakagawa, U. Staufer and H.-P. Herzig // *JOSA A.* – 2005. – V. 22(7). – P. 1432-1441.
15. **Novotny, L.** Near-field imaging using metal tips illuminated by higher-order Hermite-Gaussian beams / L. Novotny, E.J. Sanchez, X.S. Xie // *Ultramicroscopy.* – 1998. – V. 71. – P. 21-29.
16. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – V. 27(10). – P. 2188-2197.
17. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards and E. Wolf // *Proc. Royal Soc. A.* – 1959. – V. 253. – P. 358-379.
18. **Khonina, S.N.** Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, Allerton Press. – 2011. – V. 20, No. 1. – P. 23-42.
19. **Khonina, S.N.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // *Optics Letters.* – 2013. – V. 38, No. 17. – P. 3223-3226.

STUDY OF POLARIZATION SENSITIVITY OF NEAR-FIELD MICROSCOPE USING A BINARY PHASE PLATE

S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev, O.Yu. Moiseev
Image Processing Systems Institute of the RAS

Abstract

We investigate theoretically and experimentally distribution of electric field components in a focal plane at rotation of a plate with π -phase jump placed in the focused beams. We analyze the polarizing sensitivity of the various apertured metalized probes on the basis of comparison of theoretical and experimental results. It is shown, that with growth of diameter of the aperture window of a probe an essential change of sensitivity occurs in favor of transverse components of the electric field and growth of signal transfer factor of a probe.

Key words: sharp focusing, plate with phase jump, electric field components, near-field scanning microscope, aperture metalized probes.

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Хонина Светлана Николаевна** – см. стр. 306 этого выпуска.



Алфёров Сергей Владимирович, стажёр-исследователь ЛМНТ ИСОИ РАН, аспирант, программист лаборатории НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, ближнепольная микроскопия.

Sergei Vladimirovich Alferov, trainee researcher of Laboratory of Micro- and Nanotechnology at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Post graduated student, programmer of laboratory SRL-35 of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, near-field microscopy.



Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.



Моисеев Олег Юрьевич, 1959 года рождения, в 1982 г. окончил 5-й факультет Куйбышевского авиационного института. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию. На данный момент занимает должность старшего научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: технологические процессы создания микроструктур дифракционной оптики.

E-mail: moiseev@smr.ru.

Oleg Yurevich Moiseev, Candidate of Technical Sciences; senior staff scientist of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: technological process of diffractive optics.

В редакцию поступила 8 июня 2013 г.