

роля поляризации падающего излучения и коэффициента его ослабления.

Экспериментальные исследования полностью подтвердили выводы теоретического анализа четырехпризменных конфигураций ослабителя излучения, а также корректность разработанной математической модели.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о возможности построить восьмипризменный ослабитель для $K \approx 10^{-12}$ из двух зеркально симметричных четырехпризменных попарно параллельных каскадов, расположенных на одной платформе. При этом необходимо сохранить возможность юстировки каждой пары призм в отдельности. В данном случае отдельная юстировка каждого из каскадов является правомочной, поскольку каждый из них сохраняет направление распространения исходного излучения. При этом для отдельных частей сохранены все достоинства попарно параллельной конфигурации четырехпризменного ослабителя и благодаря зеркальной симметричности каскадов до-

стигнута слабая чувствительность коэффициента ослабления всей системы к ее юстировке.

Л и т е р а т у р а

1. Ковалев А. А. и др. Калиброванный френелевский ступенчатый ослабитель мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 17—21; Kovalev A. A. et al. Calibrated Fresnel stepwise attenuator of laser radiation power // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 2. P. 130—136.

2. Родионов С. А. Основы оптики. СПб: Изд-во СПб. техн. ун-та, 2000.

3. Лурье А. И. Аналитическая механика. М: Физматлит, 1961.

4. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

Дата принятия 01.10.2013 г.

535.417:53.082.54

Влияние фокусировки на латеральное разрешение интерференционного микроскопа

Г. Г. ЛЕВИН, Н. Н. МОИСЕЕВ, Я. А. ИЛЮШИН, В. Л. МИНАЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: Levin@vniiofi.ru

Проанализирована зависимость латерального разрешения интерференционного микроскопа от расстояния между фазовой ступенькой и плоскостью фокуса объектива предметного канала микроскопа. Проведено сравнение результатов измерений на нескольких длинах волн, полученных методом численного моделирования в широком диапазоне высот фазовой ступеньки и путем обработки реальных фазовых изображений.

Ключевые слова: интерференционный микроскоп, латеральное разрешение, фазовая ступенька, метод конечных разностей во времени.

The studies were carried out at several wavelengths by numerical simulations in the wide range of the phase step heights, as well as by processing the real phase images obtained.

Key words: interference microscope, lateral resolution, phase step, finite difference in time domain method.

В [1] приведены результаты измерений латерального разрешения интерференционного микроскопа для разных длин волн оптического излучения и высоты прямоугольной фазовой ступеньки, показавшие зависимость этих результатов от соотношения между длиной волны и высотой ступеньки и возможность получения латерального разрешения, существенно превосходящего дифракционный предел Аббе.

Фазовый объект в виде прямоугольной ступеньки образован двумя параллельными плоскостями, сдвинутыми по высоте на величину h и имеющими одинаковый коэффициент отражения. Объекты такого типа характерны для микроэлектромеханических систем и микроэлектроники в целом. Для получения максимального разрешения необходимо выполнить точную фокусировку. Однако при работе с фазо-

выми объектами в виде ступеньки надо учитывать, что обе плоскости не могут быть одновременно в фокусе. Либо одна, либо другая, или обе плоскости находятся вне фокуса, а при увеличении высоты ступеньки до значений, превышающих глубину резкости R_z , изображение одной из плоскостей размывается и может вообще исчезнуть.

Глубина резкости определяется по размеру пятна Эйри и рассчитывается по формуле

$$R_z = 2\lambda/(NA)^2, \quad (1)$$

где λ — длина волны оптического излучения, NA — числовая апертура. При увеличении NA значение R_z уменьшается, а аксиальная разрешающая способность микроскопа повышается. Для максимальных значений NA иммерсионных

объективов ($NA = 1,3$) и $\lambda = 500$ нм $R_z = 590$ нм, что требует очень точной фокусировки при построении изображений. Для сравнения: штатный объектив микроинтерферометра Линника МИИ-4М имеет $NA = 0,65$ и $R_z = 2,37$ мкм.

Глубина резкости имеет большое значение для фокусировки, так как определяет возможные пределы перемещения плоского объекта вдоль оси без существенного ухудшения качества изображения. Очевидно, что фазовые объекты высотой меньше или больше глубины резкости ($h < R_z$, $h > R_z$) должны рассматриваться отдельно. В данной работе использовались ступеньки, высотой существенно меньше глубины резкости.

В связи с постоянной дефокусировкой изображения фазовой ступеньки были проведены экспериментальные исследования и численное моделирование зависимости латерального разрешения интерференционного микроскопа от фокусировки, а также оценка возможности точной фокусировки по амплитудному изображению.

Фокусировка по амплитудному изображению (определение диапазона фокусировки). В работе на фазовом микроскопе всегда присутствует этап фокусировки по, так называемому, «живому» или амплитудному изображению, показывающему распределение в поле зрения микроскопа интенсивности излучения, отраженного от объекта. Процесс фокусировки завершен, когда границы деталей изображения становятся контрастными и легко различаются глазом. Суммарная интенсивность излучения, отраженного от объекта, максимальна. Это используется при построении алгоритмов автоматической фокусировки. Особенность «живого» изображения заключается в том, что основание и вершина ступеньки имеют одинаковый коэффициент отражения и практически не различимы визуально. На изображении наблюдается лишь граница между ними в виде одной или нескольких полос разной интенсивности, параллельных области перепада высот ступеньки. Эти полосы — результат интерференции излучения, дифрагировавшего на краях верхней и нижней плоскостей. Они видны в небольшом интервале отклонений от фокуса, определяемом глубиной резкости. Их вид и количество зависят от высоты перепада, а также от положения ступеньки относительно фокусной плоскости, что необходимо при настройке на фокус.

Применяя объектив с большой числовой апертурой, можно видеть, что при малой высоте ступеньки (порядка $\lambda/10$) фокусировка сопровождается заметной трансформацией изображения в области перепада высот ступеньки с уменьшением количества полос, что создает возможность привязки структуры изображения к положению фокуса Z_f . Изменение вида полос наблюдается при наклоне ступеньки вдоль плоскости перепада высот, когда положение ее разных участков, попадающих в поле зрения микроскопа, будет разным относительно фокуса. Значительно сложнее обстоит дело при большой высоте ступеньки (порядка $\lambda/4$ и больше). В этом случае вид дифракционного изображения изменяется слабо в процессе фокусировки, и практически невозможно определить положение фокуса визуально.

С учетом изложенного настройка фокуса в интерференционном микроскопе осуществляется по интерференционным полосам, формируемым при включении опорного канала. При этом добиваются максимального контраста полос и синусоидальности их профиля. Одновременно регист-

рируются суммарная по поверхности интенсивность отраженного излучения и вид ее распределения (суммарный контраст интерференционной картины). При этом учитывается расположение области перепада высот относительно центра поля зрения, так как основание ступеньки и ее высота вносят разный вклад в суммарную интенсивность и по-разному влияют на суммарный контраст интерференционной картины.

Таким образом, при измерениях следует отказаться от поиска точного фокуса и изменить положение объекта относительно фокуса в пределах диапазона фокусировки контролируемым способом, например, при помощи нанопозиционера T-115 фирмы MAD City Labs, Inc. (США) провести измерения в каждой точке, затем выбрать ту, в которой достигнут ожидаемый результат.

Для демонстрации данного вывода измерены и рассчитаны численными методами значения линейных интервалов δx , разрешаемых интерференционным микроскопом при различном положении фазового объекта относительно фокуса $\Delta Z = Z - Z_f$. Величина δx определяет разрешающую способность микроскопа и обратно пропорциональна ей.

Численное моделирование. В связи с отсутствием набора фазовых ступенек, необходимого для подробного анализа зависимости разрешения от высоты, исследование проводили путем численного моделирования рассеяния электромагнитных полей на бесконечно протяженном объекте в виде прямоугольного выступа. Ширина выступа достаточна для того, чтобы каждую из двух ступенек рассматривать независимо. Высоту ступенек изменяли в диапазоне 10—210 нм.

Моделирование осуществляли на основе приближенного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во времени (FDTD, Finite Difference in Time Domain) [2, 3]. Поле рассеянной волны регистрировали на некоторой плоскости, параллельной плоскости выступа, а затем пересчитывали в плоскость фокусировки микроскопа при помощи процедуры обратного распространения [3, 4]. Расстояние до фокуса оптической системы отсчитывали от середины ступеньки.

Для приема отраженного излучения использовали иммерсионный объектив с показателем преломления жидкости $n = 1,46$, поэтому оптическая высота фазовой ступеньки увеличивалась в n раз. Для упрощения представления результатов иммерсионную жидкость исключали из моделирования, а длины волн уменьшали в n раз. В результате вместо доступного в эксперименте интервала длин волн 458—633 нм для моделирования использовался интервал 313—419 нм. Чтобы получить зависимости оптического разрешения от фокусировки, для каждой комбинации длины волны и высоты ступеньки проводили расчет при разных положениях ступеньки относительно фокуса оптической системы в диапазоне ± 500 нм с интервалом 100 нм.

Моделирование показало, что вид зависимости разрешения от величины и знака дефокусировки ΔZ обусловлен соотношением между λ и h . При малой высоте ступеньки самое высокое разрешение получено при $\Delta Z = 0$, а при удалении от фокуса оно снижается, т. е. величина δx увеличивается, причем монотонным образом. При увеличении h монотонность нарушается, а максимальное разрешение может быть как в положении точного фокуса, так и вне его.

В таблице приведены значения линейных интервалов δx в нанометрах для четырех значений высоты ступеньки. Значения 20, 180 нм — высоты ступенек, используемые в эксперименте. Для $h = 140$ нм получены минимальные значения разрешаемых линейных интервалов, т. е. максимальное разрешение. Высота ступеньки 120 нм выбрана потому, что она достаточно близка по величине к $\lambda/4$, когда согласно [5] разрешение должно быть максимальным, и при этом наблюдается высокое разрешение. Представленные в таблице данные показаны в логарифмическом масштабе на рис. 1.

Значения δx интерференционного микроскопа в нанометрах в зависимости от дефокусировки оптической системы для $\lambda = 419$ нм

Высота h , нм	Значение δx при отклонении от фокуса ΔZ , нм										
	-500	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	500
20	1280	1040	760	620	600	580	600	620	740	1060	1280
120	40	40	60	80	120	120	140	160	160	180	180
140	60	40	20	40	20	20	40	20	40	40	40
180	200	180	180	180	160	160	160	160	160	160	180

Численное моделирование подтвердило возможность получения разрешения интерференционного микроскопа, превышающего дифракционный предел Аббе. Этот результат получается при некоторых определенных положениях ступеньки относительно фокуса оптической системы, зависящих от λ и h . Высота ступеньки, при которой достигается самое высокое разрешение, близка к $\lambda/3$, что отличается от высоты $\lambda/4$, приведенной в [5]. Можно отметить некоторые общие тенденции в характере зависимости разрешения от дефокусировки. При h порядка $\lambda/15$ зависимость практически симметрична относительно фокуса, при $\lambda/15 < h < \lambda/3$ разрешение выше (ступенька размещена к объективу ближе, чем фокус), а при $h > \lambda/3$ дальше, чем фокус.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования велись при помощи автоматизированного интерференционного микроскопа МИА-1 (№ 44713-10 в Государственном реестре СИ), работающего по методу фазовых шагов. Оптическая схема эксперимента описана в [4]. Измерения проводили с использованием аргонового лазера на длинах волн 458—514 нм и гелий-неонового лазера на длине волны 632,8 нм. В качестве объектов исследований выбраны эталонные меры высоты ступенек с прямоугольным профилем и номинальной высотой $179,4 \pm 2,0$ нм и $19,9 \pm 0,8$ нм. Изображение формировалось иммерсионным объективом с глицерином в качестве рабочей жидкости.

Ступеньки наклоняли на небольшой угол относительно зондирующего луча вдоль области перепада высот так, что положение крайних точек плоскости выступа (или плоскости основания) относительно друг друга отличалось приблизительно на 0,7 мкм. Это позволяло при регистрации одного фазового изображения получать ряд профилей ступеньки на различном удалении от фокуса. Во время измерений ступеньку сдвигали на высоту 300 нм при помощи нанопозиционера. Этим сдвигом совместно с наклоном ступеньки получали необходимый набор данных о разрешении интерференционного микроскопа в зависимости от положения сту-

пеньки относительно фокуса с тем же интервалом дефокусировки, как и при численном моделировании.

При малой высоте ступеньки интервал δx , рассчитанный по фазовому изображению, всегда был больше интервала, соответствующего дифракционному пределу Аббе, и возрастал при увеличении длины волны. При этом он был меньше, чем показало численное моделирование, а его зависимость от дефокусировки не такая сильная, хотя и была заметна, особенно на длине волны 633 нм. На рис. 2 приведены данные, полученные на длинах волн 458 и 633 нм для ступенек

высотой $h = 20$ и 180 нм (с учетом иммерсии 29 и 263 нм, соответственно). Для ступеньки $h = 180$ нм получены другие результаты. Во-первых, на длине волны 633 нм значения разрешаемого интервала δx меньше интервала 178 нм, соответствующего дифракционному пределу (напомним, что значение разрешаемого интервала в [1] определяли по полуширине первой производной от профиля фазового изображения ступеньки). Зависимость разрешения от де-

фокусировки показывает некоторое периодическое отклонение от среднего, что согласуется с видом зависимости разрешения, полученной численным методом. На длине волны 458 нм в некоторых положениях ступеньки относительно фокуса наблюдается аномально низкое разрешение. Это происходит из-за того, что дифракционные полосы на фазовом изображении сливаются вместе, и профиль сечения фазового изображения резко расширяется. В целом же можно отметить, что для длины волны 458 нм и ступеньки $h = 263$ нм (с учетом иммерсии) разрешение выше и ближе к центру диапазона фокусировки, где результаты измерений изменяются достаточно слабо и группируются вокруг некоторого среднего значения.

Были проведены также измерения со ступенькой $h = 180$ нм без использования иммерсии. На длине волны 633 нм высота ступеньки оказывается между $\lambda/4$ и $\lambda/3$. В этом случае иммерсионный объектив использовали не в штатном режиме, но это не помешало получить наилучший результат по разрешению, при котором $\delta x = 46$ нм. Отсутствие иммерсии привело к значительному увеличению глубины резкости и, соответственно, диапазона фокусировки. Зависимость δx от фокусировки для длин волн 633 и 458 нм показана на рис. 3. На длине волны 458 нм разрешение низкое, его относительное изменение в пределах диапазона фокусировки невелико. А вот на длине волны 633 нм величина δx уменьшается на краях диапазона фокусировки, а в центре — повышается.

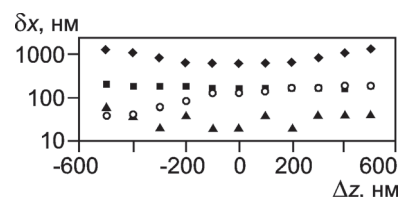


Рис. 1. Зависимость разрешаемого интервала δx от дефокусировки, полученная численным методом на длине волны 419 нм для ступенек высотой: $\blacklozenge$ — 20 нм, $\circ$ — 120 нм, $\blacktriangle$ — 140 нм, $\blacksquare$ — 180 нм

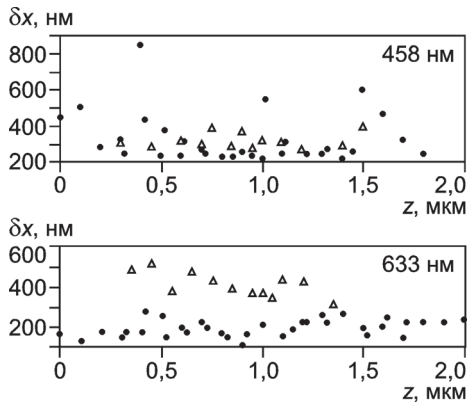


Рис. 2. Зависимость разрешаемого интервала δx от положения ступеньки в пределах диапазона фокусировки, полученная экспериментальным методом: $\bullet$, Δ — высота ступенек соответственно 263 и 29 нм

Соответственно разрешение на краях повышается, а в центре — понижается. Такого типа зависимость при численном моделировании (с учетом влияния иммерсии) не наблюдалась. Заметим, что высокое разрешение получилось на обоих концах диапазона фокусировки, где приосевые и наклонные лучи играют разную роль в формировании фазового изображения.

Результаты измерений, в которых объектив предметного канала использовался в штатном режиме, не противоречат результатам численного моделирования, поскольку не показана четкая взаимосвязь между латеральным разрешением и качеством фокусировки (за исключением случая нештатного использования иммерсионного объектива).

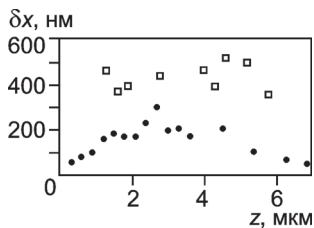


Рис. 3. Зависимость разрешаемого интервала δx от положения ступеньки в пределах диапазона фокусировки для $h = 180$ нм в отсутствие иммерсии; $\bullet$, $\square$ — длины волн соответственно 633 и 458 нм

Закключение. Таким образом, проведены исследования зависимости латерального разрешения интерференционного микроскопа от расстояния между фазовой ступенькой и плоскостью фокуса объектива предметного канала микроскопа на разных длинах волн. Наиболее подробные исследования для большого числа значений высоты фазовой ступеньки выполнены методом численного моделирования. Они показали сложную взаимосвязь между исследуемой зависимостью и соотношением между высотой фазовой ступеньки и длиной волны зондирующего излучения. Каждой высоте ступеньки соответствует свой вид зависимости латерального разрешения от дефокусировки ΔZ , а положение максимального разрешения с большой вероятностью не совпадает с фокусом. Для поиска этого положения необходимо каждый раз снимать зависимость $\delta x(Z)$ в пределах диапазона фокусировки. Измерения зависимости $\delta x(Z)$ на двух ступеньках подтверждают данный вывод.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.552.11.7056 от 11.07.2012 г.) с использованием оборудования ЦКП ВНИИОФИ.

Л и т е р а т у р а

1. **Левин Г. Г. и др.** О латеральном разрешении интерференционного микроскопа // Измерительная техника. 2013. № 5. С. 16—19; **Levin G. G. et al.** The lateral resolution of an interference microscope // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 5. P. 486—491.
2. **Totzeck M., Tiziani H. J.** Interference microscopy of sub-lambda structures: A rigorous computation method and measurements // Opt. Commun. 1997. V. 136. P. 61—74.
3. **Yee K.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Trans. Anten. Propagat. 1966. V. 14. P. 302—307.
4. **Taflov A., Brodwin M. E.** Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1975. V. 23. P. 623—630.
5. **Тычинский В. П.** Сверхразрешение и сингулярности в фазовых изображениях // УФН. 2008. Т. 178. С. 1205—1214.

Дата принятия 24.09.2013 г.