

2. Ковалев А. А. и др. Вычисление поглощенной фотодиодом мощности излучения по его экспериментальным вольт-амперным характеристикам // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 40—43; Kovalev A. A. e. a. Calculation of the radiation power absorbed by a photodiode from its experimental current-voltage characteristics // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 1. P. 57—62.

3. Ковалев А. А. и др. Измерение вольт-амперных характеристик термостабилизированных кремниевых фотодиодов // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 22—25; Kovalev A. A. e. a. Measurement of the current-voltage characteristics of thermally stabilized silicon photodiodes // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 12. P. 1364—1370.

4. Geist J. e. a. Numerical Modeling of Silicon Photodiodes for High-Accuracy Applications. Pt. II. Interpreting Oxide-Bias Experiments // J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 1991. V. 96. N 4. P. 471—479.

5. Geist J., Baltes H. High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency // Appl. optics. 1989. V. 28. N 18. P. 3929—3939.

6. Ковалев А. А. и др. Потери в самокалибрующихся трап-детекторах за счет диффузного рассеяния // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 38—42. Kovalev A. A. e. a. Losses in self-calibrating trap detectors due to diffuse scattering // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 4. P. 408—414.

Дата принятия 17.06.2013 г.

535.417:53.082.54

Сравнение латеральных разрешений оптического и интерференционного микроскопов

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

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

** Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Проведено сравнение латеральных разрешений оптического и интерференционного микроскопов. Рассмотрено понятие латерального разрешения интерференционного микроскопа на основе измерения фазовой ступеньки. Приведены результаты экспериментов и численного моделирования.

Ключевые слова: интерференционный микроскоп, латеральное разрешение, фазовая ступенька.

The comparison of lateral resolutions of optical and interferometric microscopes was carried out. A concept of the interference microscope lateral resolution based on the phase step measurement is considered. The results of experiments and numerical simulations are presented.

Key words: interference microscope, lateral resolution, phase step.

Критерий латерального разрешения оптического микроскопа — степень размытия двух точек. В случае если эти точки самосветящиеся, то согласно критерию Релея их изображения находятся на пределе разрешения, когда центральный дифракционный максимум одной совмещен с первым минимумом другой. При этом условии расстояние между мак-

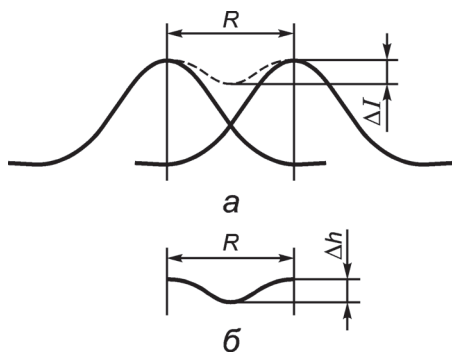


Рис. 1. Критерий разрешающей способности для амплитудного (критерий Релея) (а) и фазового (б) изображений

симулами равно радиусу кружка Эйри, а провал по освещенности ΔI составляет 22,5 % [1]. Фактически критерием разрешения является изменение амплитуды световой волны между точками, позволяющее наблюдателю (камере) различить, что они разные, а не сливаются (рис. 1, а). Пунктирной линией показана сумма интенсивностей сигналов от данных точек, так как волны складываются некогерентно. Вид функции размытия точки не зависит от интенсивности сигнала и, следовательно, критерий Релея энергонезависим [2].

При помощи оптического микроскопа регистрируют изменение амплитуды, т. е. исследуют только те объекты, которые изменяют амплитуду излучения (амплитудные объекты), а при применении интерференционного микроскопа (ИМ) регистрируют изменение фазы, и получаемое изображение называют фазовым. Фазовое изображение представляет двумерное распределение оптической разности хода.

Латеральное разрешение фазового изображения ИМ связано с преобразованием фазы, которое может быть обусловлено как изменением геометрии (перепадом высоты),

так и показателя преломления объекта. Поэтому аналог светящейся точки в оптической микроскопии — фазовая ступенька в интерференционной микроскопии. В этом случае можно предположить, что критерием латерального разрешения будет такая степень размытия двух рядом стоящих ступенек, при которой перепад между ними — изменение фазы Δh — можно зарегистрировать микроскопом (рис. 1, б) и по нему определить, что ступени разные. Таким образом, латеральная разрешающая способность ИМ определяется двумя факторами: степенью размытия границы ступени и перепадом высоты.

Современные ИМ способны регистрировать очень малые изменения фазы, равные тысячным долям длины волны используемого излучения. В [2] в качестве параметра разрешения выбрано значение перепада фазы $\pm\pi/4$ и основным фактором, определяющим латеральную разрешающую способность ИМ, назван вид границы ступени.

В связи с изложенным выше возникают следующие вопросы: чем определяется кривизна границы ступени на фазовом изображении и отличается ли она от кривизны функции размытия точки на амплитудном изображении. По сути, задача состоит в сравнении амплитудного и фазового распределений для фазовой ступени.

В [2] показано, что максимальный градиент функции размытия точки ограничен значением 0,4, в то время как градиент фазовой ступени не ограничен. Возрастание градиента на фазовых изображениях автор [2] объясняет наличием сингулярных точек, в которых фаза претерпевает разрыв. Также, по его мнению, признаком сингулярности и дислокаций являются «вилки» — определенные смещения интерференционных полос на изображении. Существование сингулярных точек подтверждено экспериментально на приведенных в [2] фазовых изображениях толстых клеток, полученных при помощи микроскопа «Эйрискан» и имеющих разрывы фазы. Также в указанной работе введен энергозависимый параметр разрешения, равный отношению нормированного радиуса диска Эйри к минимальному измеряемому при помощи микроскопа расстоянию, определяемому соотношением сигнал — шум. Однако присутствие сингулярных точек на фазовых изображениях, наблюдаемых в микроскоп Линника, является спорным, а приводимые автором разрывы, вероятно, связаны с изменениями фазы больше 2π . Такие разрывы возникают при обработке интерферограмм в полосах конечной ширины и устраняются при операции разворачивания (сшивки) фазы [3].

В [4] показаны возможности преодоления критерия Релея при использовании ИМ. Для подтверждения этого приведена физическая модель, состоящая из двух когерентных источников с различными фазами и амплитудами, расположенных на разном расстоянии. Сделан вывод, что, анализируя вид фазового распределения, можно найти количество источников, расстояние между ними, разность фаз и отношение амплитуд. Однако представленная модель и ее анализ не свидетельствуют о возможности преодоления критерия Релея. Авторы [4] представляют разработанный прибор — интерференционный микроскоп МИМ-2 с латеральным разрешением 10—15 нм. Предложенная методика анализа фазового распределения применима только для случая, когда априори имеется информация об исследуемом объекте и его параметры близки к используемой в расчетах модели. На практике такое встречается редко.

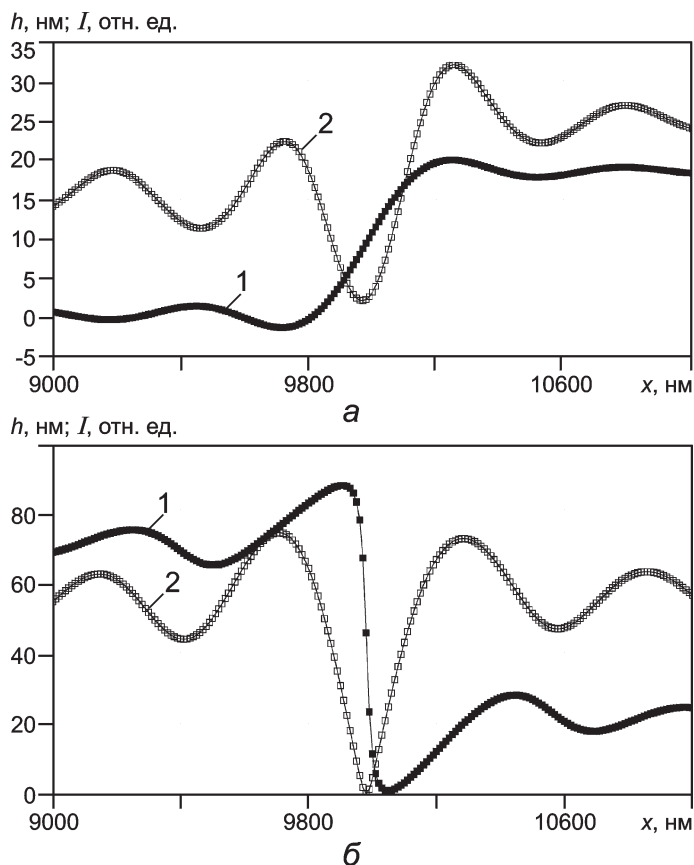


Рис. 2. Сечения фазового h (кривая 1) и амплитудного I (кривая 2) изображений ступенек высотой 20 (а) и 180 нм (б), полученные численным моделированием; x — поле зрения с шагом 10 нм; 1 отн. ед. соответствует 1 градации серого на изображении; ширина перепада ступени 10 нм

Для ответа на поставленные вопросы авторами настоящей работы проведены численное моделирование методом конечных разностей во времени (Finite Difference in Time Domain (FDTD)) [5, 6], а также экспериментальные исследования на автоматизированном ИМ Линника МИА-1 [7]. Методика измерения и полученные данные подробно описаны в [8]. Для исследования использовали эталонные меры высоты ступеньки номинальной высотой 20 и 180 нм производства VLSI (США), представляющие вытравленные в стекле канавки, покрытые хромом. Микроскоп МИА-1 применяли с иммерсионным микрообъективом АПО-МИ (ЛОМО) увеличением $90\times$ и числовой апертурой 1,25; иммерсионная жидкость — глицерин с показателем преломления $n = 1,46$. Размер поля зрения на видеокамере составлял 16×12 мкм, размер пиксела в плоскости изображения — 11,5 нм. Источник излучения — полупроводниковый лазер с длиной волны 659 нм. Фазовое и амплитудное распределения реконструировали методом фазовых шагов.

На рис. 2, а, б представлены графики сечений амплитудных и фазовых изображений, полученные в результате численного моделирования. Параметры моделирования (высота ступени, характеристики микрообъектива, иммерсия, длина волны) соответствуют экспериментальным данным. На сечении амплитудного изображения (кривая 2) есть минимум (провал), справа и слева от него — два локальных

максимума, которым соответствует перепад между минимумом и максимумом на фазовом изображении (кривая 1). Минимум на амплитудном изображении совпадает с серединой перепада на фазовом изображении и является областью перепада на модели ступеньки. Сравним амплитудное и фазовое изображения исходя из ширины провала амплитудного изображения и перепада фазового изображения. Полученные значения представлены в таблице.

Сравнение амплитудного и фазового изображений ступенек высотой 20 и 180 нм

Высота ступени, нм	Моделирование		Эксперимент	
	Ширина провала амплитудного изображения, нм	Ширина перепада фазового изображения, нм	Ширина провала амплитудного изображения, нм	Ширина перепада фазового изображения, нм
20	530	530	679	701
180	580	140	713	264

Вследствие того что высота ступени 180 нм, находящейся в иммерсии, превысила порог $\lambda/4$, для используемой в моделировании нормировки вычислим высоту ступени как

$$h = \lambda/(2n) - h_i, \quad (1)$$

где h_i — истинная высота ступени.

Согласно (1) высота ступени 180 нм после реконструкции составила 46 нм. Для ступени высотой 20 нм (см. рис. 2, а) ширина провала составляет 530 нм, что соответствует крите-

рию Релея, ширина перепада такая же — 530 нм. Для ступени 180 нм (см. рис. 2, б) ширина провала — 580 нм, а ширина перепада — 140 нм.

На рис. 3, а, б приведены результаты сравнения сечений амплитудных и фазовых изображений ступенек 20 и 180 нм в иммерсии, полученных экспериментально. В этом случае для используемой в программе реконструкции нормировки высоту ступени определим по формуле

$$h = \lambda/2 - nh_i$$

и получим значение 67 нм, что близко к 80 нм.

Для ступени 20 нм (см. рис. 3, а) ширина провала составляет 679 нм, ширина перепада — 701 нм. Для ступени 180 нм (см. рис. 3, б) ширина провала — 713 нм, а ширина перепада — 264 нм.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: результаты численного моделирования совпадают с экспериментальными; ширина провала амплитудного изображения ступени не зависит от ее высоты; ширина перепада фазового изображения ступени обусловлена высотой ступени и уменьшается при ее увеличении. Последний вывод согласуется с основным выводом в [8]: пространственное разрешение ИМ связано не только с длиной волны, но и высотой фазовой ступеньки. Если высота ступени близка к $\lambda/4$, то пространственное разрешение фазовых изображений превосходит пространственное разрешение традиционных оптических изображений, ограниченное дифракционным пределом разрешения.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7056 от 11.07.2012 г.).

Литература

1. Скворцов Г. Е. и др. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1969.
2. Тычинский В. П. Сверхразрешение и сингулярности в фазовых изображениях // УФН. 2008. Т. 178. С. 1205—1214.
3. Ковалев А. А., Сухоруков К. А. Восстановление формы волнового фронта при больших изменениях фазы // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 17—19; Kovalev A. A., Sukhorukov K. A. Reconstruction of the Shape of a Wavefront in the Presence of Large Phase Changes // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 4. P. 343—347.
4. Andreev V. A., Indukaev K. V. The Problem of Sub-Rayleigh Resolution in Interference Microscopy // J. Rus. Laser Res. 2003. V. 24. N 3. P. 220—236.
5. 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.
6. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1966. V. 14. P. 302—307.
7. Минаев В. Л. Интерференционный микроскоп для измерения формы поверхности в микро- и нанодиапазонах // Метрология. 2012. № 7. С. 19—24.
8. Левин Г. Г. и др. О латеральном разрешении интерференционного микроскопа // Измерительная техника. 2013. № 5. С. 16—19.

Дата принятия 21.05.2013 г.

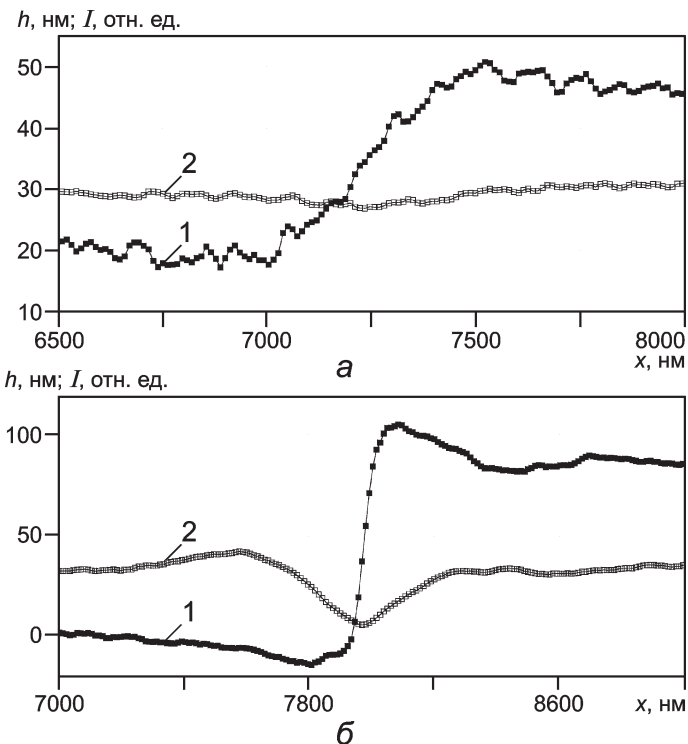


Рис. 3. Сечения фазового h (кривая 1) и амплитудного I (кривая 2) изображений ступенек высотой 20 (а) и 180 нм (б), полученные экспериментально