

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ СКАНИРУЮЩИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Традиционно считается, что предел возможного в оптико-электронике ставит фундаментальный рэлеевский критерий разрешения оптических приборов [1], на 20...30 % улучшенный за счет высокого качества сигнала с фотоприемной матрицы. Эта величина реально размещает границу разрешения на уровень 0.15...0.3 мкм. Микроэлектронные технологии с проектными нормами ниже 0.13 мкм ставят задачу смещения этой границы в область 0.05...0.09 мкм, в противном случае оптические методы контроля качества изделий становятся неприемлемыми. Данные значения явно уходят в область сверхразрешения.

Под сверхразрешением классически понимается получение изображения участка поверхности объекта с различием объектов, меньших половины длины волны зондирующего излучения [2, 3]. Такой подход сегодня не совсем приемлем, если учесть возможности ближнепольной оптики (БПО). Ее действие основано на присутствии в дальней зоне излучения вполне идентифицируемых следов взаимодействия света с микрообъектом, находящимся в ближнем световом поле, локализованным на расстояниях, ощутимо меньших длины волны излучения. В техническом смысле БПО сочетает элементы обычной оптики и сканирующей зондовой. С 1993 г. ведется промышленный выпуск приборов БПО, их предельное ожидаемое разрешение достигает величины в 13 нм, что соответствует лучшим экспериментальным результатам [3, 4]. Возможности БПО велики, но существенным недостатком является малое расстояние между зондом и исследуемой поверхностью.

В работах [5, 6, 7] обозначены возможности динамической микроскопии малых смещений (ДММС). В них расширен информационный базис построения изображений в сканирующих системах. Смещение предельно сфокусированного зонда по исследуемой поверхности на величину, меньшую планируемого разрешения, фиксация изображений дифракционного поля в дальней зоне, расшифровка последовательности кадров с распознаванием малых объектов и последующая реконструкция изображений с учетом динамических изменений в дифракционных картинах позволяют улучшить разрешение исходной системы.

Совместное использование преимуществ БПО и ДММС дает надежду на достижение требуемого предела разрешения с приемлемой величиной

«зазора» между сканируемой полупроводниковой пластиной и микрообъективом со встроенным зондом БПО. Плоскостность пластины в пределах чипа сегодня составляет величину в несколько десятых долей микрометра.

В предлагаемом решении используется фильтрующее свойство оптической системы при передаче изображения структуры с пространственной частотой более высокой, чем предельная разрешаемая данной оптической системой. Исследуемый образец сканируется зондом, перемещаемым вдоль объекта с малым шагом.

Для более наглядного представления рассмотрим одномерный случай. В качестве зонда взят луч с распределением освещенности по нормальному закону

$$\text{gauss}(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Изображение в плоскости анализа регистрируется многоэлементным фотоприемником в каждом из q положений. Регистрируется как амплитуда, так и фаза излучения, попавшего на фотоприемник. Объект представляет собой миру с коэффициентом пропускания $t(x)$, изменяющимся по синусоидальному закону.

$$t(x) = \begin{cases} 1 + \sin \omega x, & \text{при } a < x < b; \\ 1, & \text{при } x < a, x > b. \end{cases} \quad (2)$$

Параметры a и b – границы синусоидального изменения коэффициента пропускания, ω – пространственная частота периодической структуры. После взаимодействия излучения зонда и исследуемой структуры сигнал имеет вид

$$\text{pr}(x) = \text{gauss}(x) t(x). \quad (3)$$

Далее на каждом шаге с помощью прямого Фурье-преобразования вычисляется спектр сигнала.

Рассмотрим оптическую систему, пропускающую все частоты без изменений. Ниже на графиках представлена амплитуда E результирующего спектра на значимых шагах сканирования:

Пусть реальная оптическая система, ЧКХ которой равна

$$H(\omega) = \begin{cases} \frac{2}{p} \left[\arccos \frac{\omega}{\alpha} - \frac{\omega}{\alpha} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\alpha} \right)^2} \right], & \text{при } |\omega| \leq \alpha, \\ 0, & \text{при } |\omega| > \alpha, \end{cases} \quad (4)$$

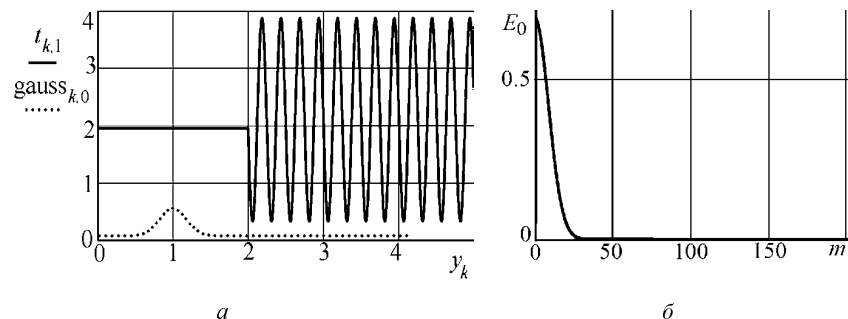


Рис. 1. Зонд вне объекта, объект (а) и результирующий спектр (б)

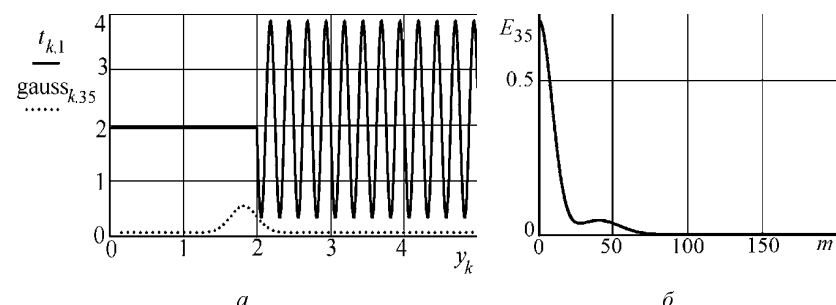


Рис. 2. Зонд наезжает на объект, объект (а) и результирующий спектр (б)

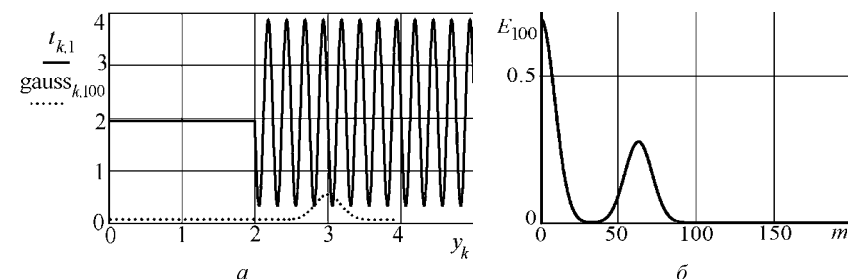


Рис. 3. Зонд на объекте, объект (а) и результирующий спектр (б)

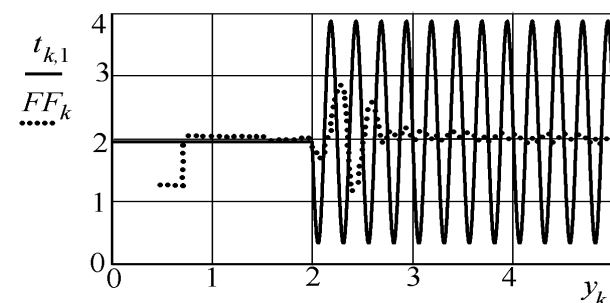


Рис. 4. Распознанная форма сигнала с фазовым смещением

«не видит» частоты второго максимума результирующего спектра, т. е. α меньше 25 (рис. 3). Однако изменение спектра при «наезде» на структуру позволяет распознать ее форму (рис. 4).

Таким образом, предлагаемое решение позволяет по изменениям низкочастотных составляющих во время наезда сканирующего зонда на неразрешимую традиционными методами структуру восстановить ее вид.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Войтович М. А. Суперразрешение оптических систем. М.: Обзоры по электронной технике, 1975.
3. Либенсон М. Н. Преодоление дифракционного предела в оптике // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, №3.
4. Сороко Л. М. Суперразрешение в оптике и затухающие волны. <http://bsfp.media-security.ru/school5/8.htm>.
5. Klimchinskii I. L., Shestakov K. M. New principles of optical system adaptation for superresolution as applied to precision objective lens decentration tests pattern // Recognition and Image Analysis. 1992. Vol. 2, No. 3. P. 359–361.
6. Германович П. С., Шестаков К. М. Анализ структуры объектов методом динамической микроскопии малых смещений // Современные методы обработки сигналов в системах измерения, контроля, диагностики и управления: Материалы н-т конференции 18–22 декабря 1995 г. Мн., 1995. Ч. 2. С. 166–170.
7. Бобко Ю. К., Шестаков К. М. Метод динамической микроскопии малых смещений // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов. Выпуск 2. Мн.: Белгосуниверситет, 1996. С. 59–62.