

ЛАЗЕРНЫЕ МИКРОСКОПЫ МИМ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

А.Коршак, П.Игнатьев, А.Лопарев., К.Индукаев, П.Осипов
abk@amphoralabs.ru

Развитие нанотехнологий диктует необходимость увеличения разрешения и быстродействия измерительного оборудования. Применение современных микроскопов для nanoиндустрии имеет ряд ограничений, таких как контактность измерений и высокие требования по уровню вакуума. Отсутствие доступных, быстродействующих микроскопов высокого разрешения является одним из ключевых факторов, сдерживающих прогресс в нанотехнологической сфере.

Специалисты отмечают необходимость разработки и внедрения новых микроскопов с нанометровым разрешением. Такие приборы могут быть использованы для научно-исследовательских работ и неразрушающего контроля качества продукции nanoиндустрии.

Современный уровень развития нанотехнологий предъявляет следующие требования к исследовательским микроскопам:

- разрешение в диапазоне 1–10 нм;
- высокое быстродействие (не менее 1 кадра /с);
- доступная цена;
- возможность исследования широкого круга объектов;
- функциональность и возможность комплексного анализа физических свойств изучаемого нанообъекта;
- отсутствие разрушающего воздействия на объект.

Наиболее распространенными типами микроскопов для nanoиндустрии являются электронные, сканирующие зондовые и оптические микроскопы. Каждый из упомянутых классов приборов обладает своими достоинствами и недостатками, определяющими эффективность их применения для решения конкретных задач.

Наибольшая доля рынка исследовательских микроскопов для нанотехнологий приходит-

ся на электронные микроскопы [1], что связано с их высоким разрешением (0,1–1 нм). К недостаткам таких микроскопов относятся высокая стоимость и большие эксплуатационные затраты.

В последние годы наблюдается интенсивный рост продаж сканирующих зондовых микроскопов, обладающих высоким (до 0,1 нм) разрешением. Вместе с тем низкое быстродействие и контактность измерений ог-

раничивают применение этих приборов. Кроме того, низкое быстродействие исключает применение данных видов микроскопов для контроля качества продукции нанoeлектроники.

Оптимальные показатели быстродействия демонстрируют оптические микроскопы. Важный их недостаток – низкое разрешение в плоскости ХУ: разрешение лучших оптических микроскопов не превышает 150 нм [2].

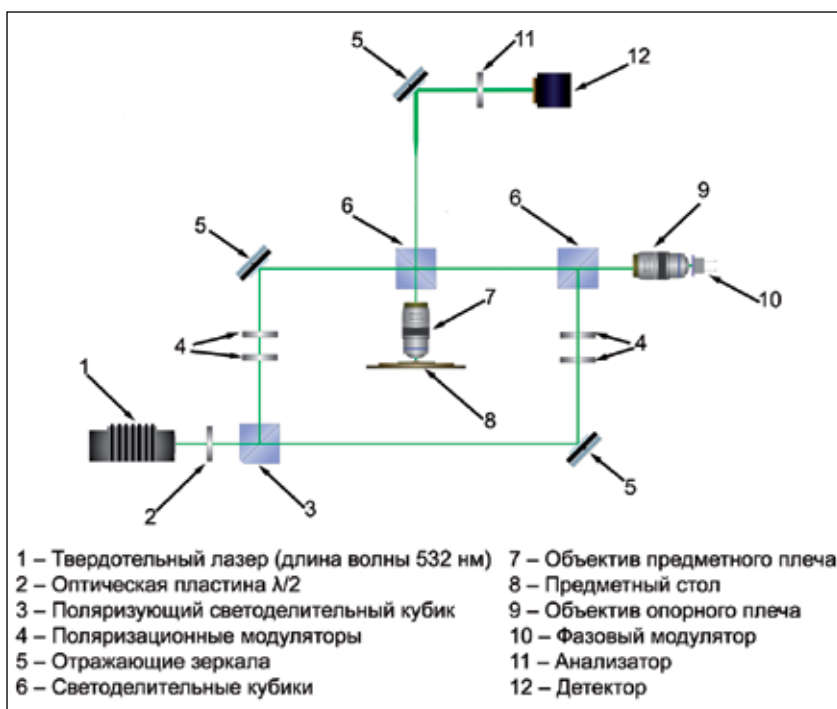


Рис.1. Принципиальная схема канала лазерного микроскопа МИМ (профилометра)



Таким образом, на рынке существует лишь незначительное количество микроскопов, в достаточной степени отвечающих сформулированным выше требованиям.

Наиболее перспективными исследовательскими инструментами для наноиндустрии остаются оптические профилометры, например, на основе интерферометров белого света (ИБС) [3]. Это объясняется в первую очередь высоким быстродействием, отсутствием поврежденный исследуемого объекта и относительно небольшой стоимостью оптических приборов. Однако исследовательская группа из Национального Института Стандартизации и Технологий (США) показала, что микроскопы на основе ИБС дают 80% ошибку определения параметров шероховатости поверхности в диапазоне $R_a=50-300$ нм [4]. Это делает невозможным обеспечение метрологически достоверных измерений наноструктур с помощью профилометров на основе ИБС.

По этой причине возникает острая необходимость в разработке новых методов оптической микроскопии и создании на их основе доступных приборов, сочетающих высокое быстродействие с нанометровым разрешением.

В качестве альтернативы традиционным методам предлагается метод модуляционной интерференционной микроскопии (МИМ) [5], на основе которого разработано новое поколение быстродействующих профилометров с разрешением в плоскости XY 10–100 нм.

Отличительная черта метода МИМ заключается в том, что

позволяет получать информацию об объекте непосредственно из распределения фазы и поляризации в интерференционном изображении.

Лазерный микроскоп МИМ представляет собой двухканальный прибор. Навигационный канал служит для выбора области измерения, лазерный канал используется для получения изображения с нанометровым разрешением и представляет собой модифицированную схему интерферометра Маха – Цандера, оснащенного фазовым модулятором (10) в опорном плече. В качестве источника излучения используется твердотельный лазер (1) с длиной волны 532 нм. Такая реализация имеет ряд преимуществ перед схемами Миро [3] и Майкельсона [6]. Во-первых, здесь присутствует светоделитель с переменным коэффициентом деления (2), (3) позволяющий добиться максимального качества изображения при исследовании прозрачных или слабоотражающих структур. Во-вторых, поляризационные модуляторы (4) в каждом плече интерферометра открывают новые возможности при исследовании периодических и оптически анизотропных структур.

Фазовый модулятор, установленный в опорном плече интерферометра, предназначен для формирования фазово-модулированного интерференционного сигнала по закону, определяемому выбранным алгоритмом. Высокое быстродействие приборов МИМ достигается за счет оригинального алгоритма обработки интерферограмм, при котором закон перемещения опорного зеркала выбира-

ется, исходя из минимизации ошибки вычисления фазы. Кроме того, использование высокоскоростных CMOS – детекторов (12) позволяет достичь скорости 3–200 кадров/с [5].

Принцип работы лазерного микроскопа МИМ основан на измерении локальных фаз световой волны, отраженной объектом. Регистрируемая МИМ фазовая высота является физической величиной, связанной с геометрической высотой объекта, его показателем преломления и длиной волны излучения следующим образом:

$$\Phi(x, y) = \frac{(\Phi_0 - \Phi_{obj}) \lambda}{2\pi} \frac{\lambda}{2} - \Phi_0, \quad (1)$$

где Φ_0 – начальная фаза, Φ_{obj} – сдвиг фазы, вносимый измеряемым объектом, λ – длина волны лазерного излучения, Φ_0 – постоянный сдвиг фазы, определяемый выбором начальной точки отсчета.

Для оптически неоднородного объекта фазовая высота определяется выражением:

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{2} \int_0^{z_{max}} (n(x, y, z) - n_1) dz - \Phi_0, \quad (2)$$

где $n(x, y, z)$ – локальное значение показателя преломления объекта, n_1 – показатель преломления иммерсионной среды.

В общем случае, связь фазового изображения с геометрическим рельефом не однозначна, так как в этом изображении закодирована комплексная информация об оптических (показатель преломления, прозрачность, анизотропия) и геометрических свойствах объекта. Поэтому для их интерпретации требуется применение особых алгоритмов анализа фазовых изображений, адаптированных под конкретный класс изучаемых объектов. Фазовое изображение несет в себе комплексную информацию об объекте, поэтому имея такое изображение можно определить:

- геометрическую высоту;
- показатель преломления;
- поляризационные свойства;
- фазовый и материальный состав;

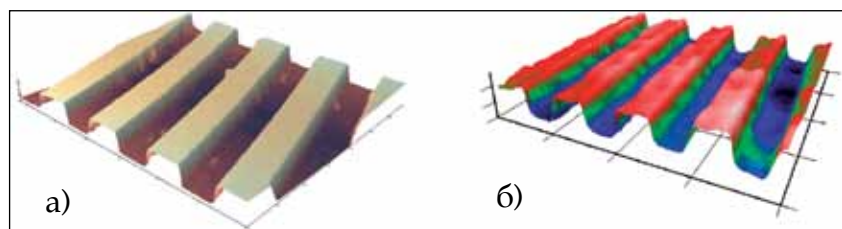


Рис. 2. 3D-изображения тестовой структуры TGZ-100, полученные на атомно-силовом микроскопе Veeco Dimension (а) и на профилометре МИМ (б)

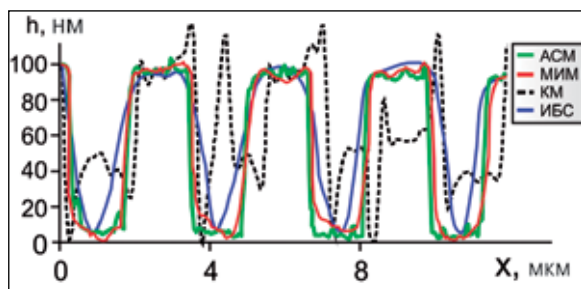


Рис.3. Профили тестовой структуры TGZ-100

- механические напряжения на поверхности.

Таким образом, метод МИМ позволяет не только получить изображение структуры с нанометровым разрешением, но и проводить комплексный анализ оптических свойств объекта.

Для демонстрации возможностей лазерных профилометров МИМ нового поколения в наноиндустрии приведем некоторые примеры исследования различных объектов.

На рис.2а, б, в приведены результаты исследований тестовой структуры TGZ-100 производства компании NT-MDT. На рис.2а, б представлены 3D-изображения структуры TGZ-100, полученные с помощью атомно-силового микроскопа Veeco Dimension 5 и лазерного профилометра МИМ, соответственно.

Приведенные 3D-изображения демонстрируют высокие исследовательские способности профилометра МИМ относительно распространенной модели АСМ. Следует отметить, что изображение 2а получено за 3 мин, а изображение 2б – за 1 с.

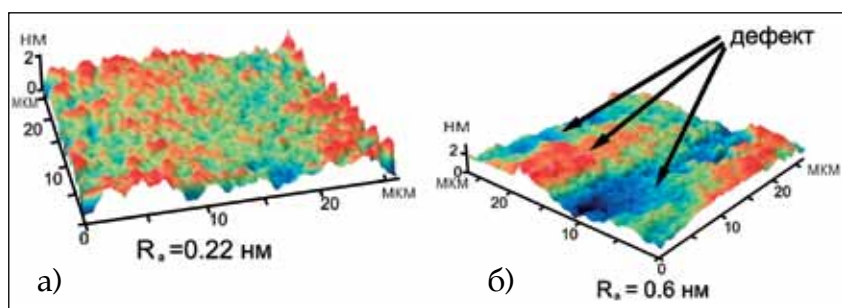


Рис.4. Изображение GaAs подложки интегральной микросхемы: (а) поверхность с низкой шероховатостью, (б) поверхность с искаженной формой поверхности

На рис.3 приведены профили тестовой структуры TGZ-100, полученные на современных микроскопах.

Профиль структуры TGZ-100 измерялся на АСМ Veeco Dimension 5, профилометре МИМ

(МИМ), конфокальном микроскопе LEXT OLS3100 (КМ) и интерферометре белого света Wyko NT9800 (ИБС).

На профиле, полученном на конфокальном микроскопе LEXT OLS3100 видно, что вследствие дифракции излучения на вертикальной стенке структуры возникают артефактные пики. При этом разрешение OLS3100 не превышает 200 нм.

Профиль, полученный с помощью интерферометра белого света Wyko NT9800, сглажен вследствие низкой числовой апертуры объектива Мירו (Mirau).

Следовательно, профилометр МИМ наиболее точно воспроизводит форму поверхности, что подтверждается данными, полученными на АСМ.

Оптическое разрешение лазерного профилометра МИМ заметно снижается при исследовании высокопериодических структур, например дифракционных решеток с периодом менее 400 нм. Данный эффект обусловлен тем, что ненулевой порядок дифракции, содержащий в себе информацию

о форме измеряемой поверхности, не попадает в апертуру объектива. Однако эта задача легко решается путем использования иммерсионных объективов с апертурой порядка 1,3 – 1,4, что предусмотрено конструктивными особенностями МИМ.

Наиболее распространенной продукцией наноиндустрии являются интегральные микросхемы. В процессе их изготовления важно обеспечить контроль шероховатости эпитаксиальных подложек, которая наряду с дефектами кристаллической решетки во многом определяет электрические и магнитные свойства формируемых на них элементов микросхем. Как отмечалось выше, для выполнения этой задачи разрешения оптических микроскопов не достаточно, а применение СЗМ не целесообразно ввиду их низкого быстродействия.

Применение лазерного микроскопа МИМ для контроля подложек позволяет не только определять параметры шероховатости с нанометровым разрешением, но и выявлять ряд дефектов, недоступных другим методам микроскопии, таких как, например, искаженность формы и механические напряжения. На рис.4а, б представлены 3D-изображения разных областей арсенид – галлиевой (GaAs) подложки ИБС.

Обработка этих изображений позволяет получить параметры шероховатости: в данном случае шероховатость подложки составляет $R_a = 0,22$ нм (а) и $R_a = 0,6$ нм (б). Область подложки, изображенная на рис. 4а не имеет дефектов поверхности. Тогда как из рис. 4б видно, что область подложки имеет искажение плоскостности. Этот дефект может привести к нарушению свойств ИС. Таким образом, лазерный профилометр МИМ может быть использован для неразрушающего контроля качества GaAs подложек.

Помимо точного определения параметров шерохова-

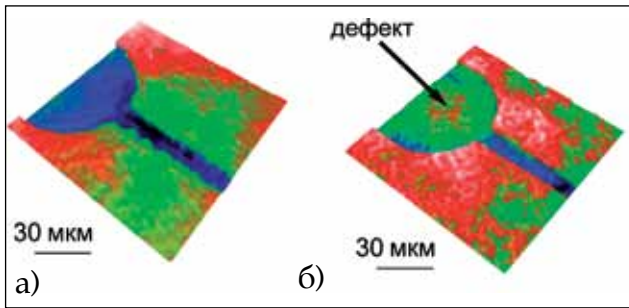


Рис.5. Топологические элементы GaN светодиода: а) – качественный элемент, б) – элемент с дефектом травления

тости и геометрии поверхности подложек, профилеметр МИМ позволяет оценить качество процесса травления ИС. На рис.5а, б представлены изображения топологических элементов GaN светодиода.

На фазовом портрете контактной площадки GaN светодиода (рис.5б) четко видны остатки фоторезиста. Таким образом, исследование топологии (GaN) светодиода показало, что лазерные микроскопы МИМ могут использоваться для кон-

приборов, удовлетворяющих постоянно растущим требованиям по разрешению, воспроизводимости измерений и быстродействию. Проведенные исследования подтверждают высокие характеристики и исследовательские возможности лазерных микроскопов МИМ.

Профилеметры и другие приборы на основе технологии МИМ могут быть использованы на различных стадиях производства наноструктур, начиная с научных исследований и

контроля качества полупроводниковых структур.

В заключение следует отметить что технология МИМ – относительно новая и весьма перспективная – позволяет создать новый класс

заканчивая контролем качества конечной продукции.

Литература

1. Отчет "Microscopy: The Global Market" (Микроскопия: Глобальный Рынок), Исследовательский центр BCC Research
2. Olympus LEXT OLS 3100 Overview.
3. J.C. Wyant, White Light Interferometry, Proceedings of SPIE, Vol. 4737, pp. 98–107, July 2002.
4. White light interferometry exhibits error, Photonics Spectra, august 2005.
5. Лопарев А.В., Игнатьев П.С., Индукаев К.В., Осипов П.А., Мазалов И.Н., Козырев А.В. Высокоскоростной модуляционный интерференционный микроскоп для медико-биологических исследований. – Измерительная техника, 2009, № 11, с. 60–64.
6. G.S.Kino and S.Chim, "Mirau Correlation Microscope," Appl. Opt. 29, pp. 3775–3783, 1990.