



# ИЗМЕРЕНИЕ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП С НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

С.Введенский,  
А.Захарченко,  
В.Троицкий

Современные методы оптической микроскопии позволяют измерять объекты размером 0,8 мкм и более с минимальной погрешностью 0,05 мкм. Однако полупроводниковая промышленность уже давно нуждается в измерении размеров менее 0,5 мкм. Авторам статьи удалось разработать методику измерения объектов размером до 0,2 мкм с помощью оптического микроскопа с точностью до 15 нм<sup>\*\*\*</sup>. Методика основана на поиске стабильного положения фокуса и использовании некогерентного освещения.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Модели формирования изображения объектов, наблюдаемых в оптический микроскоп при когерентном, некогерентном и частично когерентном освещении, всесторонне исследованы. Сегодня можно рассчитать получаемое изображение практически любого объекта. Однако на практике из-за сложности волновых эффектов все более широкое применение находят эмпирические методы, использующие теорию лишь для обоснования выбора тех или иных алгоритмов. Требование к точности измерений таково, что даже небольшое несоответствие теории и эксперимента недопустимо, а учесть все свойства материалов, объекта и микроскопа довольно трудно.

Рассмотрим два крайних способа освещения объекта: когерентное и некогерентное, которые достигаются регулировкой апертурной диафрагмы микроскопа. Считается, если апертура конденсора равна апертуре объектива, что достигается при полностью открытой апертурной диафрагме, освещение объекта становится некогерентным [1]. Полностью же когерентным освещение можно считать при минимальном размере апертурной диафрагмы. Если наблюдается рельеф шероховатой поверхности с размерами выступов, меньшими длины волны света, то его можно увидеть лишь при когерентном освещении, так как в этом случае играют роль фазовые сдвиги. Однако объект размером больше длины волны выглядит наиболее четко при некогерентном освещении. Это происходит потому, что при некогерентном освещении в спектре изображения объекта присутствуют частоты вдвое большего диапазона [2].

Второе достоинство некогерентного освещения объекта – линейность изображения по интенсивности оптического сигнала, а не по его амплитуде, как это происходит при когерентном освещении. Поскольку, в конечном счете, видеокамера регистрирует именно интенсивность сигнала, гораздо удобнее работать с этой величиной.

Третьим немаловажным достоинством некогерентного освещения является, как правило, большая по сравнению с когерентным

Технология измерения критических размеров элементов СБИС с помощью оптического микроскопа имеет ряд преимуществ перед конкурентами: растровой электронной микроскопией<sup>\*</sup>, эллипсометрией<sup>\*\*</sup> и др. В отличие от растровой электронной микроскопии она не загрязняет образец и требует значительно меньшего времени на измерения, а в отличие от эллипсометрии – работает с одиночным объектом, а не с периодической структурой. И хотя оптическая микроскопия допускает гораздо большую погрешность, чем эти два метода, все же она до сих пор составляет им конкуренцию. Показаны преимущества некогерентного освещения перед когерентным при измерении критических размеров объектов менее 0,5 мкм. Разработан метод измерения критических размеров до 0,2 мкм с помощью алгоритма поиска стабильного положения фокуса. Погрешность метода ( $2\sigma$ ) составляет 10–20 нм.

освещением интенсивность освещения, а следовательно, меньшая выдержка камеры и более высокая точность измерений.

И, наконец, при некогерентном освещении разъюстировка системы освещения, которая в обычных микроскопах совсем не рассчитана на стабильность, приводит лишь к неравномерности осве-

## Представляем авторов статьи

**ВВЕДЕНСКИЙ Сергей Андреевич.** Инженер НИИСИ РАН. Окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 2003 г. Занимается проблемами технологических измерений.

**ЗАХАРЧЕНКО Алексей Александрович.** Аспирант физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и инженер НИИСИ РАН. Окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 2003. Занимается проблемами технологических измерений в полупроводниковой промышленности, в частности прикладной оптической и электронной микроскопией.

**ТРОИЦКИЙ Вячеслав Юрьевич.** Канд. физ.-мат. наук, ведущий сектором технологических измерений НИИСИ РАН. Занимается контролем технологического процесса изготовления СБИС.

<sup>\*</sup> ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 1997, №3–4, с. 65–68, №6, с. 37–40.

<sup>\*\*</sup> Появившаяся около 10 лет назад методика измерения критических размеров с помощью эллипсометра. Фирма Nanometrics (США) выпустила установку NanoCD, погрешность измерений на которой не превышает 10 ангстрем.

<sup>\*\*\*</sup> Статистическая погрешность по уровню 98% – 2σ.

щения по полю зрения, что легко устраняется операцией вычитания фона, тогда как при когерентном освещении из-за фазовых эффектов она меняет характер изображения в целом [3].

**МЕТОД ПОИСКА ФОКУСА**

Большинство современных эмпирических методов измерения размеров с помощью оптического микроскопа основано на выделении характерных особенностей волновой картины (например, минимумов интенсивности) и измерений по ним или по некому уровню интенсивности, отсчитываемому от них. Такие методы зачастую используют функцию автофокусировки микроскопа, которая сама по себе вносит довольно большую погрешность. Реальная погрешность таких методов выше 0,05 мкм. В разработанном методе этот недостаток устраняется алгоритмом поиска фокуса.

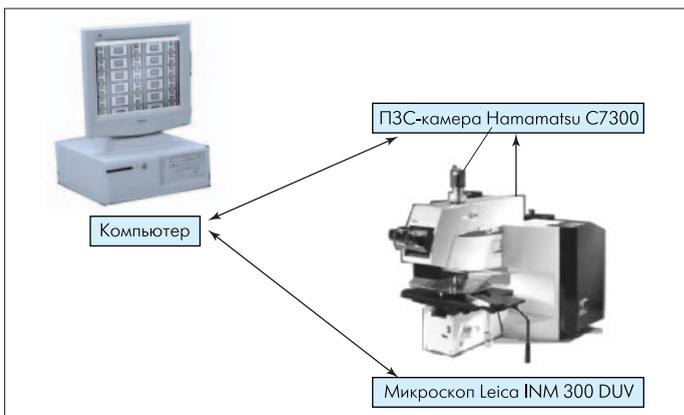
Принцип автофокусировки основан на поиске плоскости объекта по размеру пятна отраженного от объекта луча лазера. Поскольку пятно лазера намного больше размера объекта, а поиск фокуса очень быстрый, почти мгновенный, процесс, этот принцип не может обеспечить достаточной точности. В результате изображение сильнее всего зависит от расфокусировки именно в положении, близком к фокусу. Все это приводит к мысли, что необходимо производить поиск фокуса по самому изображению, т.е. составить некую характеристику изображения, меняющуюся с изменением фокуса, найти некое эталонное положение фокуса и соответствующее ему эталонное значение характеристики изображения и определить наилучшее положение фокуса как положение, при котором отклонение характеристики от эталонной минимально. Заметим, что эталонное положение фокуса не обязательно должно быть положением объекта точно в фокусе. Оно должно быть стабильным, повторяемым и как можно меньше зависеть от размеров объекта.

**АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

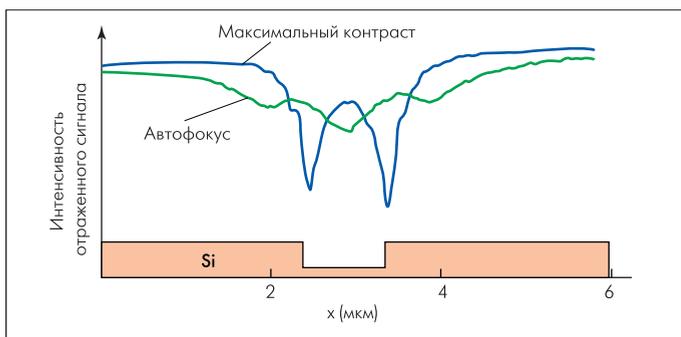
В самом простом случае поиск наилучшего положения фокуса можно проводить последовательным перебором его значений. Такой метод был реализован авторами для микроскопа Leica INM 300 DUV, который обладает встроенным программируемым микропроцессором и ультрафиолетовой ПЗС-камерой Hamamatsu C7300 (рис.1). Разработанное программное обеспечение, управляющее микроскопом, позволяет пошагово менять положение столика по вертикали.

Алгоритм измерения критических размеров таков.

Определяется наилучшее положение фокуса. При этом находится автофокус микроскопа, который необходим для быстрого позиционирования столика по вертикали. Затем, если необходимо, производится сдвиг столика по вертикали на некоторую величину с за-



**Рис.1. Общая схема измерительной установки**



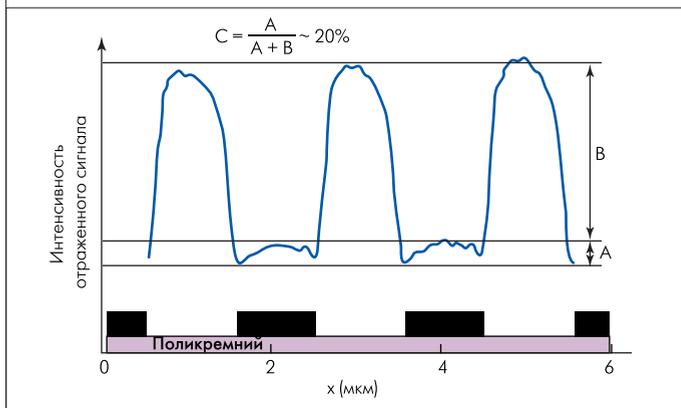
**Рис.2. Профили интенсивности для положения максимального контраста и автофокуса для протравленного кремния (глубина 0,12 мкм)**

ведомо худшим положением фокуса. Далее столик дискретно перемещается по вертикали (с шагом 0,018 мкм) и одновременно считываются изображения с ПЗС-камеры. Среди этих изображений выбирается наиболее соответствующее эталонному положению фокуса.

Затем непосредственно измеряется критический размер объекта по характерным точкам на профиле интенсивности.

Если необходимо измерить абсолютный размер, то нужно провести калибровку по эталонному объекту с известным размером и связать получаемый размер с абсолютным. Однако в большинстве случаев абсолютный размер нужно знать лишь приблизительно, а важен только уход или изменение размера со временем. В разработанном программном обеспечении калибровка проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Все измерения проводились в УФ-излучении ближней области ( $\lambda \approx 248$  нм) с помощью объектива 150xNA=0,9.



**Рис.3. Профиль интенсивности изображения для периодической структуры фоторезист (темный) на поликремнии. Величина C характеризует относительную интенсивность света, отраженного от фоторезиста**

Рассмотрим характерные положения фокуса и соответствующие им профили интенсивности изображения. Для протравленной канавки в кремнии характерно положение, при котором контраст изображения максимальный. На рис.2 представлены два профиля интенсивности: при эталонном положении и положении автофокуса. Видно, что контрасты изображений отличаются в 1,5–2 раза. При максимальном контрасте расстояние между минимумами характеризуется размер протравленной канавки. Это явление объясняется наличием тени по краям объекта, которая играет главную роль в формировании изображения в некогерентном освещении.

Повторяемость и воспроизводимость\* результатов измерений при использовании данного метода составляет 4–5 нм, что приводит к погрешности измерений 10–15 нм. Предел измерений – тот

\*Воспроизводимость с периодической юстировкой лампы.



размер, при котором минимумы еще различимы, – составляет ~ 0,4 мкм для глубины протравы 120 нм и уменьшается со снижением глубины. Ограничения также обусловлены в основном теневыми эффектами.

Для фоторезиста на некоторых подложках (кремнии, поликремнии, оксиде и т.д.), а также для других двух материалов с сильно отличающимися коэффициентами отражения, характерно такое положение, при котором относительная интенсивность изображения наиболее поглощающей области максимальна. Для фоторезиста на поликремнии (рис.3) получена повторяемость 5 нм (соответственно, погрешность ~15 нм), а предел измерений ~ 0,2 мкм.

К недостаткам описанного метода следует отнести необходимость разработки различных программ поиска для различных материалов, а также некоторые оптические ограничения. К достоинствам – хорошую повторяемость и возможность внедрения практически для любого оптического микроскопа, поддерживающего программное управление.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983.
3. Hild R. Optical problems of wafer inspection with DUV microscopy for structures of about 0.1 μm. – Microelectronic Engineering, 2002, 61–62, p.1093–1100.



#### Создание холдинга RCM Group

Научно-производственная фирма ЗАО "АБРИС", ООО "АБРИС-Технолоджи" и ЗАО "Авитон", уже зарекомендовавшие себя на рынке электроники как высокопрофессиональные и надежные бизнес-партнеры, объявляют о продолжении своей совместной работы под новым брендом – холдинг RCM Group (Russian Contract Manufacture Group). Успешный запуск производства на базе оборудования Siemens-Dematic по поверхностному монтажу печатных узлов в октябре прошлого года позволил группе компаний "АБРИС" завершить полный цикл построения контрактного производства. Отныне, благодаря использованию новых технических возможностей и мощных производственных ресурсов холдинга, заказчику обеспечен полный цикл изготовления изделий электроники – от идеи до массового выпуска.

Основные виды предоставляемых услуг по совместной деятельности в рамках холдинга RCM Group – разработка и изготовление печатных плат, монтаж и контроль электронных блоков, комплексное обеспечение электронными компонентами. Это оптимизирует работы по производству электронной продукции, а также диверсифицирует отдельные виды услуг. Такая схема контрактного производства избавляет заказчика от необходимости искать контрагентов на выполнение работ на разных этапах жизненного цикла изделия. Экономия времени и средств клиента позволяет значительно упростить процесс согласования технического задания и его реализации и таким образом высвободить ресурсы заказчика для других целевых программ.

По мнению Антона Ефимова, Президента RCM Group, холдинг является единственным в России контрактным производством в истинном смысле этого слова, поскольку обладает всеми необходимыми наукоёмкими, инжиниринговыми и техническими ресурсами.