

07; 12

© 1991

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ
АМПЛИТУДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОПЕ.А. Б о ж е в о л ь н а я, С.И. Б о ж е в о л ь н ы й,
А.В. П о с т н и к о в

Переход к субмикронным структурам в микроэлектронике требует развития прецизионных методов контроля геометрических размеров формируемых структур. Дифференциальный амплитудный оптический микроскоп (ДАОМ) [1] представляется перспективным для точного измерения ширины узких линий [2]. При этом точность измерений ограничивается точностью сканирования образца и параметрами оптической схемы ДАОМ [2]. В настоящей работе для прецизионного измерения ширины линий предложен и реализован компьютерный ДАОМ (КДАОМ), который позволяет существенно повысить точность измерений и разрешающую способность по сравнению с ДАОМ путем численной обработки экспериментальных данных в соответствии с развитой теорией формирования образа в таком микроскопе.

Принцип ДАОМ основан на отклонении с частотой f лазерного луча (например, при помощи акустооптического дефлектора на стоячей волне) фокусируемого на исследуемую поверхность и регистрации сигнала фотодиода, освещаемого отраженным от поверхности излучением. Амплитуда сигнала фотодиода на частоте f пропорциональна степени неоднородности коэффициента отражения сканируемого участка поверхности и может быть измерена с высокой точностью [1, 2]. Пусть изменение коэффициента отражения по амплитуде вдоль координаты сканирования x можно представить в виде $r(x) = r + \delta r \cdot g(x)$, где $r \gg \delta r > 0$, $|g(x)| \leq 1$. Можно показать, что при условии падения на поверхность гауссового пучка излучения с полушириной ω и регистрацией фотодиодом всего отраженного излучения, амплитуда сигнала фотодиода на частоте f определяется выражением

$$A(x) = \xi \rho \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\delta \alpha \delta r}{\omega^3 r} \left| \int_{-\infty}^{\infty} g(u) \exp\left[-\frac{2}{\omega^2}(x-u)^2\right] du \right|, \quad (1)$$

где ρ - мощность излучения, попадающего на фотодиод, $\xi = \eta e / h\nu$, η - квантовая эффективность фотодиода, e - заряд электрона, $h\nu$ - энергия кванта, α - амплитуда отклонения пучка дефлектором на поверхности объекта. Здесь также подразумевается выполнение условия $d \ll \omega$, что необходимо для улучшения разрешения микроскопа [2].

Отклик ДАОМ при сканировании N различных полосок ($g(x)$ ступенчатая функция) получается из (1) в следующем виде:

$$A(x) = \xi P \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2a}{\omega r} \left| \sum_{i=1}^N \delta r_i \left(\exp \left[-2 \frac{(x-a_i)^2}{\omega^2} \right] - \exp \left[-2 \frac{(x-b_i)^2}{\omega^2} \right] \right) \right|, \quad (2)$$

где δr_i — изменение коэффициента отражения i -той полоски, которая имеет координаты краев a_i и b_i . Для широких полосок, далеко расположенных друг от друга, отклик ДАОМ состоит из $2N$ пиков с центрами в a_i и b_i , а их высоты пропорциональны соответствующим δr_i . В этом случае точность измерения ширины линий ограничивается точностью определения положения максимумов $A(x)$, т.е. в лучшем случае шагом сканирования. Для узких полосок положение пиков зависимости $A(x)$ не совпадает, вообще говоря, с координатами краев. Наши расчеты показывают, что прямое измерение ширины линий по положению пиков $A(x)$ возможно вплоть до ширины на уровне 1.5ω что естественно считать разрешающей способностью ДАОМ.

Для повышения точности измерения ширины линий и разрешающей способности ДАОМ была разработана следующая двухэтапная процедура. На первом этапе (ДАОМ) находятся положения и амплитуды пиков измеренной зависимости $A_3(x)$, по которым определяются величины a_i' , b_i' и $\delta r_i'$. На втором этапе (КДАОМ) полученные параметры полосок „уточняются“ так, чтобы минимизировать среднеквадратичную невязку Δ между рассчитанной, согласно (2), зависимостью $A_p(x)$ и экспериментально измеренной $A_3(x)$:

$$\Delta(\delta r_i, a_i, b_i) = \int_{x_1}^{x_2} [A_p(x) - A_3(x)]^2 dx, \quad (3)$$

где (x_1, x_2) — интервал сканирования. Для поиска максимума Δ может быть использован один из градиентных методов [3]. Величины a_i^o , b_i^o , δr_i^o , доставляющие минимум невязке, принимаются за „исправленные“ параметры полосок. Анализ точности предложенного метода проводился для системы двух полосок одинаковой ширины W , расположенных на расстоянии $d = W$ друг от друга в зависимости от точности измерения $A_3(x)$. При этом $A_3(x)$ рассчитывалась, согласно (2), с добавлением соответствующей случайной ошибки, моделируемой с помощью генератора случайных чисел. Оказалось, что даже для 5%-ной ошибки измерения $A_3(x)$ точность измерения ширины линий увеличивается на порядок при использовании КДАОМ и полоски шириной 0.6ω могут быть достаточно точно измерены (рис. 1). Такое существенное улучшение характеристик системы при переходе от ДАОМ к КДАОМ связано с использованием всего массива экспериментальных данных

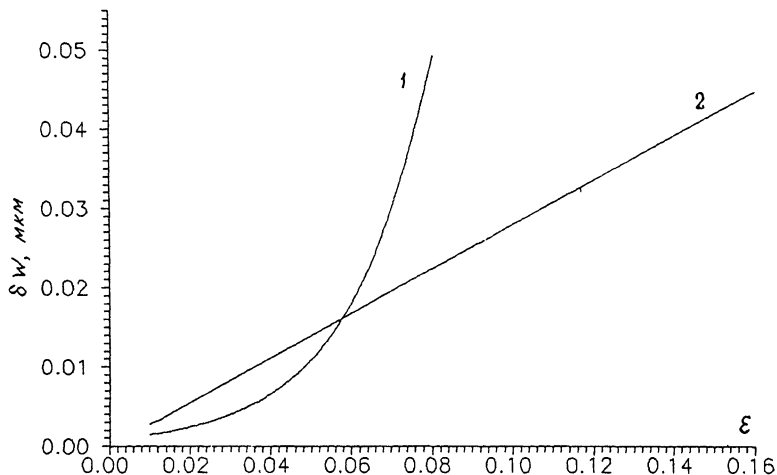


Рис. 1. Зависимость ошибки δW измерения ширины линий при помощи КДАОМ для полуширины $w = 1$ мкм и шага сканирования 0.1 мкм от величины относительной погрешности ϵ измерения отклика $A_3(x)$ для $d = W = 0.6$ мкм (1), ≥ 1.5 мкм (2).

в КДАОМ, а не только положений максимумов $A(x)$, как это происходит в ДАОМ.

Разработанная методика была опробована экспериментально при измерении параметров трех узких канавок, протравленных в слое алюминия толщиной 0.5 мкм, напыленном на поверхность кремниевой пластины. Периодическое отклонение с частотой $f = 1$ МГц луча He-Ne лазера на длине волны $\lambda = 0.633$ мкм осуществлялось с помощью акустооптической брэгговской ячейки, на которую подавался частотномодулированный сигнал. Лазерный пучок фокусировался на исследуемую поверхность $10\times$, $20\times$ или $40\times$ -кратным объективом, при этом полуширины распределений интенсивности излучения в фокусе составляли $w = 2.9$, 1.4 или 0.7 мкм соответственно. Отраженное от поверхности объекта излучение фокусировалось на фотодиод, сигнал которого на частоте 1 МГц измерялся селективным вольтметром ($\Delta f = 1$ кГц) и регистрировался компьютером типа IBM PC/AT синхронно с перемещением пьезоэлектрического столика (диапазон, шаг и время сканирования 100 мкм, 0.1 мкм и 10 сек). Ширины W канавок и расстояния d между ними измерялись также специализированным микроскопом для измерения ширины линий „LEITZ MPV-CD 2“ (разрешение 0.7 мкм, точность измерения 0.03 мкм): $W = 2.69$, 2.64, 2.83 мкм и $d = 1.36$, 1.45 мкм. Соответствующие результаты измерений при помощи КДАОМ с $40\times$ -кратным объективом составляли $W =$

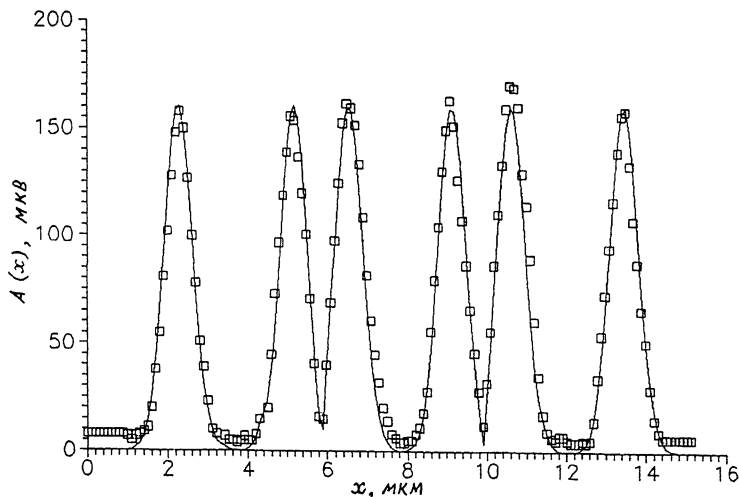


Рис. 2. Измеренная зависимость $A_s(x)$ для трех канавок в слое алюминия на кремниевой подложке для $40\times$ -кратного объектива и расчетная кривая $A_p(x)$, минимизирующая невязку.

2.72, 2.61, 2.84 мкм и $d' = 1.35, 1.48$ мкм (рис. 2), что согласуется с результатами тестовых измерений. Следует заметить, что точность измерения $A_s(x)$ в нашем случае ($\approx 3\%$) позволяет рассчитывать на точность измерений ширины линий на уровне 0.01 мкм (рис. 1). Аналогичные измерения были проведены и с другими объективами, где были получены близкие результаты ($w = 2.75, 2.58, 2.88$ мкм и $d' = 1.38, 1.50$ мкм для $10\times$ -кратного объектива) и расхождения могут быть отнесены за счет неоднородности структуры. При этом измерение структуры в режиме ДАОМ с $10\times$ -кратным объективом дает результаты $w = 3.1, 2.1, 3.2$ мкм и $d' = 1.9, 1.9$ мкм, которые кардинально отличаются от результатов тестовых измерений, так как размеры структуры находятся за пределами разрешения ДАОМ.

Таким образом, полученные результаты подтверждают справедливость предложенной методики повышения точности измерений и разрешающей способности ДАОМ и показывают возможность измерения при помощи КДАОМ ширины линии более узких, чем полуширина светового пятна в фокусе с точностью до 0.01 мкм.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] S e e C.W., V a e z I r a v a n i M. // Electron. Lett. 1986. V. 22. N 2. P. 961-962.
- [2] S e e C.W., V a e z I r a v a n i M. // Appl. Optics. 1988. V. 27. N 13. P. 2786-2792.
- [3] Х и м м е л ь б л а у Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.

Поступило в Редакцию
15 ноября 1991 г.