

УДК 535.411

Н. П. Шестаков, В. Ф. Шабанов

(Красноярск)

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ПЕРЕПАДОВ МИКРОРЕЛЬЕФА**

Обсуждается проблема измерения уступов микрорельефа с крутыми стенками, высота которых превышает четверть или половину используемой длины волны применяемого света. Рассмотрена взаимосвязь и пути преодоления неопределенности в определении знака, величины и порядка интерференции, возникающих в местах разрыва волнового фронта на уступе. Предложен и экспериментально опробован алгоритм определения порядка интерференции с помощью повторного измерения уступов на другой длине волны света.

Введение. Планарная технология производства интегральных схем позволяет формировать на плоских поверхностях топологические элементы в виде уступов с крутыми стенками. Особенность измерений высоты таких уступов состоит в том, что интерференционные полосы на их границах претерпевают разрыв, в результате чего невозможно определить порядок интерференции и знак изменения разности хода, т. е. является ли уступ переходом к бугорку или ямке.

Алгоритм работы автоматических систем измерения профиля поверхности [1–4] строится в предположении «гладкости» поверхности (сдвиг интерференционных полос в двух соседних точках интерферограммы не превышает $\lambda/4$). Предположение о «гладкости» поверхности ограничивает диапазон измеряемых уступов поверхности и область применения автоматических интерференционных профилографов. Рассмотрим, как ведет себя измерительная система профилографа [4], если предположение о «гладкости» не выполняется. Это тем более важно, что испытания профилографов часто проводят именно на искусственно созданных прямоугольных уступах [3, 4].

Автоматические интерференционные измерения уступов поверхности $h > \lambda/4$ на одной длине волны. При измерениях по методу временных интервалов [5] роль пространственного сдвига интерференционных полос δ выполняет временной интервал $\varphi(x, y)$ в точке интерферограммы с координатами x, y (рис. 1). Если с помощью пьезоэлемента привести в движение опорное зеркало интерферометра с линейной скоростью, то интерференционные полосы будут двигаться вправо с постоянной скоростью $v = \delta/t$. Поскольку опорное зеркало движется равномерно, то $v = \text{const}$, а $t \sim \delta$. В каждой точке интерферограммы электронная система измеряет время t , за которое ближайшая слева интерференционная полоса пройдет интервал $\delta = \varphi(x, y)$, лежащий с левой стороны от точки (x, y) . Величина сдвига интерференционных полос φ на одном и том же уступе зависит от начальной разности хода. Например, для пары точек с координатами (x, y) и $(x, y + 1)$ разность

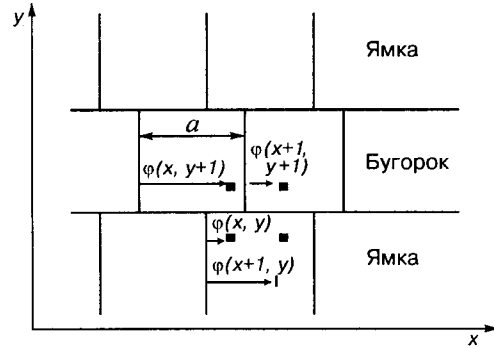


Рис. 1. Интерферограмма поверхности с бугорком высотой $\lambda/2 > h > \lambda/4$. Интерференционные полосы равномерно двигаются вправо: темные квадратики – положение фотоприемников

$\varphi(x, y + 1) - \varphi(x, y) > a/2$, а для точек с координатами $(x + 1, y)$ и $(x + 1, y + 1)$ величина разности отличается: $\varphi(x + 1, y + 1) - \varphi(x + 1, y) < a/2$, где a – ширина полосы.

Таким образом, один и тот же уступ поверхности, изображенный на рис. 1, в зависимости от начальной разности хода может восприниматься как переход ямка – бугорок или бугорок – ямка.

Разработанный ранее алгоритм измерения сдвига интерференционных полос [3, 4] основывается на анализе величины и знака разности в соседних дискретных точках интерферограммы:

$$|\varphi(x + 1, y + 1) - \varphi(x + 1, y)| < a/2. \quad (1)$$

Общий сдвиг интерференционных полос Φ в точке с координатами x, y можно представить в виде суммы дробной и целых частей:

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) + \sum_2^{x, y} Q(x, y), \quad (2)$$

где Q принимает три возможных значения: $+a$, $-a$ или 0 . Если условие (1) выполняется, то $Q = 0$, если не выполняется, то анализируется знак разности:

$$|\varphi(x + 1, y + 1) - \varphi(x + 1, y)| < 0. \quad (3)$$

Если разность положительна, то $Q = -a$, если отрицательна, то $Q = +a$.

Уже отмечалось, что алгоритм измерения сдвига интерференционных полос в соответствии с (1)–(3) записан в предположении «гладкости» поверхности, т. е. высота уступов не превышает $\lambda/4$.

Далее рассмотрим, что произойдет с реальной измерительной системой профилографа, работающего по алгоритму (1)–(3), в случае, когда на поверхности имеются уступы $h > \lambda/4$. Приготовим образец, имеющий уступы поверхности $h > \lambda/4$; определим их размер с помощью стандартного шупового профилографа М201, как это показано на рис. 2.

Образец, измеренный на шуповом профилографе, содержит уступы с высотой, превышающей четверть длины волны ($\lambda = 0,63$ мкм). В реальной практике такая ситуация не исключена, поэтому важно знать, каким образом это скажется на результате измерений.

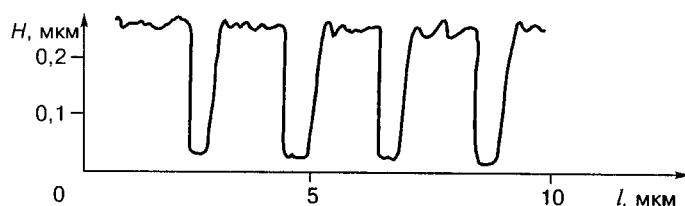


Рис. 2. Профилограмма образца с периодическим профилем; высота уступов, измеренная на приборе М201, $h = 0,25$ мкм

Измерим этот же образец на лазерном профилографе с применением алгоритма, описываемого формулами (1)–(3). На профилограмме (рис. 3) наблюдаются искажения периодического прямоугольного профиля, связанные с неопределенностью «знака» и высоты уступов при $h > \lambda/4$.

Неопределенность «знака» уступов проявляется в том, что профилограмма разделена на два примерно равных взаимно перевернутых участка. В результате ее действия в левой и правой части профилограммы вершины и впадины поменялись местами. Неопределенность высоты уступов заключается в плавном изменении величины уступа, уменьшении высоты от левого края к центру и возрастании от центра к правому краю в зависимости от разности хода. Благодаря небольшой клиновидности воздушного зазора между образцом и эталоном, разность хода световых лучей линейно возрастает в направлении оси абсцисс (хотя наклон профилограммы не наблюдается, так как линейная функция, связанная с клиновидностью, автоматически вычитается).

Поясним происхождение искажений, проявившихся на профилограмме рис. 3, с помощью двух пар точек на рис. 1. Бугорок, изображенный на рис. 1, имеет постоянную по всей плоскости высоту, однако результат измерения сдвига интерференционных полос зависит от трассы пересечения уступа или, что то же самое, от начальной разности хода, которая линейно меняется вдоль оси x . Для первой пары точек с координатами $(x, y \rightarrow x, y + 1)$ имеем невыполнение условия (1), и так как разность (3) положительна, то $Q = -a$. В результате вместо реального перехода ямка – бугорок имеем переход бугорок – ямка, а глубина ямки меньше реальной высоты бугорка. Для второй (правой) пары точек с координатами $(x + l, y \rightarrow x + l, y + 1)$, $Q = +a$, в итоге бугорок увеличивается на величину $+a$ и отображается измерительной системой как переход ямка – бугорок. Таким образом, имеет место наблюдаемая в эксперименте зависимость высоты ступеньки с крутыми стенками от начальной разности хода.

Теперь становится ясно происхождение искажений на профилограмме рис. 3. Поскольку разность хода линейно меняется в направлении оси l , то и

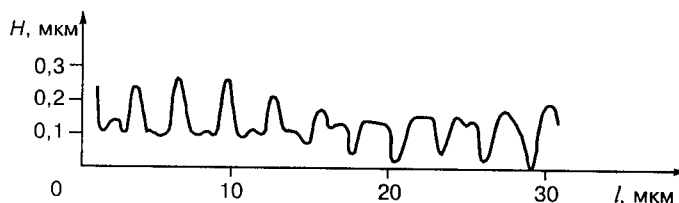


Рис. 3. Искажения периодического прямоугольного профиля, связанные с неопределенностью «знака» и высоты уступов при $h > \lambda/4$

искажения плавно переходят из одного вида в другой. Интерференционная картина повторяется с периодом a . Поэтому если изменить разность хода световых лучей так, чтобы сдвиг интерференционных полос составлял $a/2$, и произвести измерение высоты уступа при исходной и конечной разностях хода, то результат будет обязательно различным, причем один из них будет неверно отражать измеряемую высоту уступа. Из приведенных выше рассуждений вытекают важные следствия.

Для автоматических интерференционных измерений поверхностей необходимо, чтобы разница высоты между соседними точками профиля была меньше $\lambda/4$, а если это не выполняется, то возникают неопределенности, для снятия которых требуется дополнительная информация об уступе (например, о знаке или величине уступа).

Уступы высотой $h > \lambda/4$ могут быть обнаружены с помощью повторного измерения профилограммы с измененной на величину $\lambda/2$ разностью хода. Если несовпадение полученных профилей превышает величину $\lambda/4$, то на трассе профилографирования имеются уступы $h > \lambda/4$. Если разница между профилями поверхности первого и повторного измерений меньше $\lambda/4$, то на трассе профилографирования отсутствуют уступы $h > \lambda/4$.

Методика измерений, сформулированная в перечисленных выше разделах, позволяет обнаружить уступы поверхности с высотой поверхности $h > \lambda/4$ и таким образом избежать грубых ошибок и повысить достоверность измерений на одной длине волны.

Двухволновые измерения уступов с крутыми стенками. Наряду с традиционными методиками измерения профиля поверхности, основанными на измерениях на одной длине волны [6], в последние годы получила развитие двухволновая методика измерения высоты уступов [7–10], которая была разработана применительно к фазово-сдвиговой интерферометрии. Использование двух длин волн направлено на то, чтобы снять неопределенность в определении порядка интерференции на одной длине волны при высоте уступа, превышающей половину длины волны используемого света. Для этого необходимо произвести измерение на большей длине волны или на двух близких по величине длинах волн. Иными словами, более длинная волна может быть сконструирована из двух коротких.

Синтез более длинной волны из двух коротких иллюстрирует рис. 4.

Измерения проводятся поочередно на длинах волн λ_a и λ_b следующим образом: интерферометр освещается источником света с длиной волны λ_a и производится отсчет фазы $\varphi_a(x, y)$, затем без изменения базы интерферометра осуществляется смена длины волны и берется отсчет сдвига интерференционных полос $\varphi_b(x, y)$ на длине волны λ_b в тех же точках интерферограммы с координатами x, y . В результате имеем замеры сдвигов интерференционных полос на двух близких длинах волн, каждый из которых в отдельности

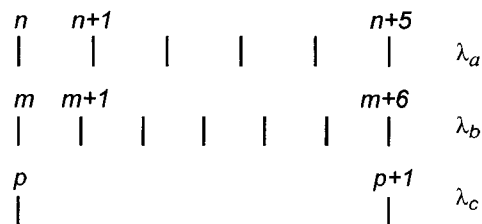


Рис. 4. Синтез более длинной волны λ_c из двух коротких λ_a и λ_b

не содержит информации об изменении собственного порядка интерференции в точках разрыва волнового фронта на уступах. Эта информация заключена в их разности:

$$\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y). \quad (4)$$

Величина и размер разности (4) зависят от начальной разности хода. Возможны два варианта:

если $\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y) \leq 0$, то порядок интерференции $n(x, y)$, $m(x, y)$ определяется по формуле

$$n(x, y) = \frac{\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)}{b - a} + 1, \quad m(x, y) = n(x, y); \quad (5)$$

если $\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y) > 0$, то порядок интерференции определяется по формуле

$$n(x, y) = \frac{b - [\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)]}{a - b} + 1, \quad m(x, y) = n(x, y) + 1, \quad (6)$$

где a, b – максимальный интервал следования интерференционных полос на длинах волн λ_a и λ_b соответственно. Вследствие экспериментальных ошибок порядок интерференции $n(x, y)$, $m(x, y)$ может отличаться от целого числа, поэтому его необходимо округлить до целочисленного значения по обычным правилам. Сдвиг интерференционных полос с учетом целых и дробных долей может быть представлен следующим образом:

$$\Phi_a(x, y) = n(x, y)a + \varphi_a(x, y), \quad (7)$$

$$\Phi_b(x, y) = m(x, y)b + \varphi_b(x, y). \quad (8)$$

Подставляя $n(x, y)$, $m(x, y)$ из формул (5), (6) с учетом знака разности (4), получаем сдвиг интерференционных полос в измеряемых в эксперименте величинах:

если $\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y) \leq 0$, то

$$\Phi_a(x, y) = a \left\{ \frac{\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)}{b - a} + 1 \right\} + \varphi_a(x, y), \quad (9)$$

$$\Phi_b(x, y) = b \left\{ \frac{\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)}{b - a} + 1 \right\} + \varphi_b(x, y); \quad (10)$$

если $\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y) > 0$, то

$$\Phi_a(x, y) = a \left\{ \frac{b - [\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)]}{a - b} + 1 \right\} + \varphi_a(x, y), \quad (11)$$

$$\Phi_b(x, y) = b \left\{ \frac{b - [\varphi_a(x, y) - \varphi_b(x, y)]}{a - b} + 2 \right\} + \varphi_b(x, y). \quad (12)$$

В абсолютных единицах высота профиля выражается следующим образом:

$$H(x, y) = \lambda_a \Phi_a(x, y)/2, \quad (13)$$

$$H(x, y) = \lambda_b \Phi_b(x, y)/2. \quad (14)$$

С учетом усреднения по результатам измерений на двух длинах волн

$$H(x, y) = [\lambda_a \Phi_a(x, y) + \lambda_b \Phi_b(x, y)]/2. \quad (15)$$

Возможность прямого определения порядка интерференции с помощью двух длин волн важна не только применительно к проблеме измерения уступов, но и для любых поверхностей, имеющих сложную форму, когда высота профиля изменяется так, что между соседними точками дискретного считывания интерферограммы изменение превышает $h > \lambda/4$. Верхний предел, ограничивающий динамический диапазон измерения уступов, можно охарактеризовать с помощью эквивалентной длины волны λ_c [7], определяемой как

$$\lambda_c = \frac{\lambda_a \lambda_b}{|\lambda_b - \lambda_a|}. \quad (16)$$

Если высота уступа $h > \lambda_c/4$, то возникают аналогичные проблемы с определением порядка интерференции для эквивалентной длины волны, как и в случае одноволновых измерений. Решение проблем возможно за счет либо привлечения дополнительных длин волн, либо уменьшения разности используемой пары волн.

Эксперимент. Двухволновые измерения уступов были выполнены на установке [3, 4] с использованием в качестве источника излучения перестраиваемого аргонового лазера на двух длинах волн $\lambda_a = 0,5145$ и $\lambda_b = 0,4579$ мкм.

Чем меньше разность используемых длин волн $\lambda_{a, b}$, тем большая эквивалентная длина волны получается и тем более точный прибор необходим для измерения сдвига интерференционных полос. Для пар волн аргонового лазера, представленных в таблице, необходима точность измерения сдвига интерференционных полос в пределах 0,005–0,05 соответственно для самых близких и дальних по величине длин волн. Длина волны $\lambda_c = 4,169$ мкм позволила измерить уступ высотой 0,5 мкм (рис. 5).

Эквивалентные длины волн аргонового лазера, синтезированные из волн $\lambda_{a, b}$, представлены в таблице.

$\lambda_{a, b}$	0,5145	0,4965	0,4880	0,4765	0,4579
0,5145					
0,4965	14,19				
0,4880	9,474	28,50			
0,4765	6,451	10,00	19,377		
0,4579	4,169	5,889	7,423	11,73	

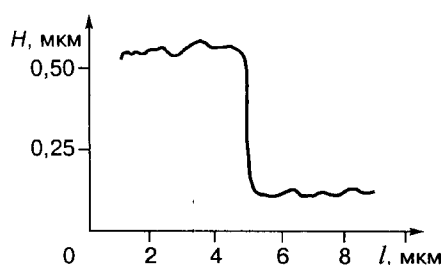


Рис. 5. Результат измерения поверхности, содержащей уступ с крутой стенкой $h = 0,5$ мкм, с помощью эквивалентной длины волны $\lambda_c = 4,169$, синтезированной из двух длин волн аргонного лазера

Заключение. Двухволновые измерения поверхностей с большими перепадами высоты позволяют добиваться существенного увеличения динамического диапазона без потери точности, присущей интерференционным измерениям.

Уступы поверхности, превышающие динамический диапазон интерференционного прибора, можно обнаруживать путем повторных измерений с разностью хода, отличающейся на $\lambda/2$ (что соответствует сдвигу интерференционных полос на $\lambda/4$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. П., Снежко Ю. А., Тычинский В. П. Лазерный микроинтерферометр // Квантовая электрон. 1975. 2, № 6. С. 1142.
2. Евтихийев Н. Н., Снежко Ю. А., Тычинский В. П. и др. Лазерный интерференционный профилограф // Квантовая электрон. 1977. 4, № 1. С. 69.
3. Шестаков Н. П., Шешуков А. П., Фроленко В. А., Гоняев В. С. Интерференционный профилограф. Красноярск, 1986. (Препр. /АН СССР. Физ. ин-т; 367Ф).
4. Гоняев В. С., Фроленко В. А., Шестаков Н. П., Шешуков А. П. Бесконтактный интерференционный профилограф // Автометрия. 1987. № 5. С. 50.
5. Шестопалов Н. Цифровой измерительный прибор // Измер. техника. 1971. № 12. С. 29.
6. Carre P. Installation et utilisation comarateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. 1966. 2. P. 13.
7. Cheng Y.-Y., Wyant J. C. Two-wavelength phase shifting interferometry // Appl. Opt. 1984. 24. P. 4539.
8. Creath K., Cheng Y.-Y., Wyant J. C. Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase shifting interferometry // Opt. Acta. 1985. 32. P. 1455.
9. Creath K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry // Appl. Opt. 1987. 26, N 14. P. 2810.
10. Шестаков Н. П., Шабанов В. Ф. Интерференционные измерения уступов с крутыми стенками. Красноярск, 1997. (Препр. /СО РАН. ИФ; 773Ф).

Поступила в редакцию 26 июня 1998 г.