

УДК 535.44

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ РЕШЁТОК

В. П. Корольков^{1,2}, А. С. Конченко^{1,2}

¹ Учреждение Российской академии наук

Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный университет»,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: victork@iae.nsk.su

Предложен метод измерения глубины калибровочных решёток, основанный на измерении спектральной зависимости дифракционной эффективности в нулевом порядке дифракции на отражение. Погрешности метода определяются тремя основными факторами: смещением максимумов спектра из-за наклона стенок канавок решётки, ошибкой задания длины волны спектрофотометра и расходимостью пучка света в установке. Теоретически показано, что в зависимости от технологии изготовления решёток и измерительного оборудования погрешность измерения лежит в пределах 0,25–1 %. Проведена экспериментальная апробация метода на промышленных калибровочных решётках. Обсуждены диапазоны применимости метода с точки зрения геометрических параметров микроструктуры отражательных решёток и характеристик используемого спектрофотометра.

Ключевые слова: измерение глубины микрорельефа, калибровочные структуры, спектрофотометрический метод, рефлексометрия.

Введение. Развитие технологий микрообработки поверхности и расширение области их применения стимулировали создание различных типов профилометров — механических, атомно-силовых, оптических [1, 2]. Практически все эти профилометры нуждаются в периодической поверке и калибровке, так как они используют косвенные методы измерения перемещения измерительной головки (иглы или объектива) — ёмкостные или индуктивные датчики либо датчики отклонения пробного лазерного пучка (применяются в большинстве атомно-силовых микроскопов для измерения смещения кантилеверов). Интерференционные микроскопы, использующие анализ полос монохроматической интерференционной картины, имеют также систематическую ошибку, вызванную эффектом широкоапертурного освещения [3, 4].

Поверка профилометров может быть осуществлена с помощью калибровочных структур, которые делятся на два основных типа: с одиночными элементами (выступ, канавка или ступенька) [5] или с массивом однотипных элементов (линейных или скрещённых ортогонально решёток). Естественно, что эти калибровочные структуры тоже должны быть измерены. Высоту ступеньки, образованной сдвинутыми по вертикальной координате двумя плоскими поверхностями, можно измерить с помощью образцового интерферометра со стабилизированным по частоте лазерным источником. Недостатком данных ступенчатых структур является их высокая стоимость, обусловленная необходимостью формирования двух достаточно протяжённых параллельных плоскостей с минимальной неровностью, разнесённых по вертикали от десятков нанометров до десятков микрометров. Поэтому такие калибровочные структуры используют для особенно ответственных метрологических задач [6, 7]. При калибровке микропрофилометров наличие большой плоской поверхности возле ступеньки не даёт никакого преимущества в точности. Более простые в изготовлении и дешёвые калибровочные решётки с периодом 3–10 мкм применяются довольно часто

для периодической калибровки атомно-силовых микроскопов [8]. От них не требуется хорошей плоскостности, так как размер области измерения обычно не превышает 100 мкм. При этом нет необходимости искать единственную ступеньку на образце. Сертификация решёток — процесс более сложный, чем ступенек. Измеряется высота многих канавок, границы которых передаются профилометрами, как правило, некорректно. Влияние краёв канавок устраняется выбором для анализа только данных со дна канавок и вершин выступов. Результаты измерений зависят от количества устраняемых из обработки некорректных данных (обусловленных аппаратной функцией образцового профилометра), локальной неровности и шумов прибора.

Существенную трудность представляет измерение глубины рельефа по всей площади калибровочной решётки, которая составляет обычно 5–10 мм². Разработка быстрой и дешёвой методики измерения с погрешностью 0,5–1 % позволила бы сделать калибровочные решётки доступными. Это принципиально важно, так как линейность профилометра необходимо проверять по нескольким калибрам для диапазонов измерения от сотен нанометров до десятков микрометров. Создание доступной общепринятой методики измерения решёток позволило бы предприятиям изготавливать собственные калибры для нужд производства, а также встраивать калибруемые таким образом тестовые микроструктуры в пластины с формируемыми изделиями микромеханики и микрооптики для упрощения отбраковки продукции.

Целью данной работы является создание, исследование и тестирование спектрофотометрического метода измерения глубины калибровочных решёток, основанного на спектральных свойствах многопорядковых отражающих дифракционных решёток [9]. Точность измерений этим методом должна быть сопоставима с существующими аналогами [1, 7].

Теоретическое обоснование метода. Предлагаемый способ использует спектральные свойства бинарных решёток с глубиной в несколько длин волн.

Рассмотрим падение света из воздушной среды на отражающую бинарную фазовую дифракционную решётку в скалярном приближении теории дифракции. Оптическую разность хода Δl лучей, отражённых от поверхности выступов и канавок, можно выразить через глубину решётки H и угол падения света α относительно нормали к поверхности:

$$\Delta l = 2H / \cos \alpha.$$

Максимум интенсивности отражённого света в нулевом порядке дифракции наблюдается, когда Δl становится кратной длине волны. Таким образом, при данном угле падения света α и глубине H максимум интенсивности нулевого порядка будет наблюдаться при освещении светом с волновым числом ($k = 1/\lambda$)

$$k = \frac{m \cos \alpha}{2H}, \quad (1)$$

где m — количество длин волн, укладываемых в Δl . Очевидно, что интенсивность нулевого порядка дифракции будет периодической функцией волнового числа с периодом $\cos \alpha / 2H$.

Пример моделирования спектральной зависимости дифракционной эффективности в нулевом порядке (NDE_0), нормированной на её максимум, для калибровочной решётки глубиной 1564 нм при угле падения света 8° демонстрирует кривая 1 на рис. 1. Расчёт проводился в рамках скалярной теории дифракции. Определив по данным графика разности волновых чисел соседних максимумов, можно вычислить среднюю глубину измеряемой решётки:

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1:N} \frac{\cos \alpha}{2\Delta k_i}, \quad (2)$$

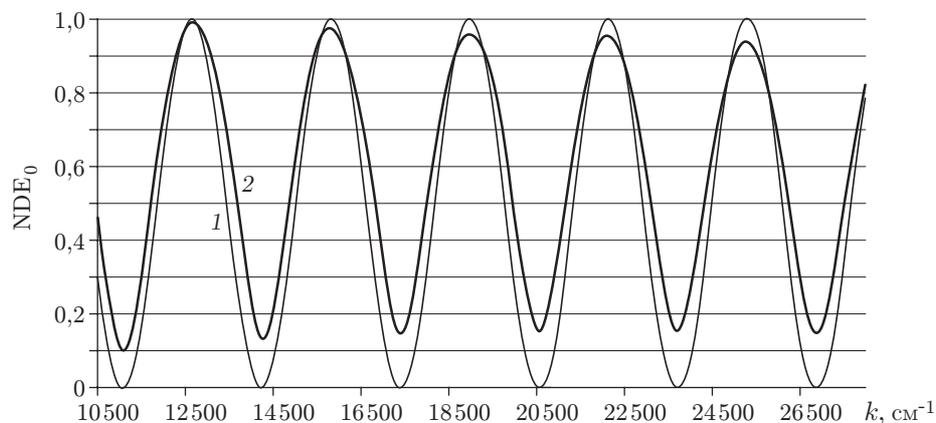


Рис. 1. Зависимость NDE_0 от волнового числа падающего излучения: кривая 1 — результат моделирования спектра отражения решётки глубиной 1564 нм; 2 — экспериментальные данные для решётки TGZ-11

где N — количество анализируемых пар соседних максимумов. Находить глубину можно и по спектральному положению минимумов, но при малой амплитуде сигнала шумы спектрофотометра будут снижать точность измерения. Также при минимальной интенсивности нулевого порядка дифракции нечётные порядки имеют интенсивность, близкую к максимальной для них величине, и соседние порядки, перекрывая частично нулевой порядок при малых углах дифракции, могут повлиять на положение минимумов его интенсивности и внести дополнительную погрешность в измерения.

Указанные особенности отличают алгоритм обработки спектра отражения, получаемого предлагаемым методом, от известного метода измерения толщины тонких плёнок на подложке при известном коэффициенте преломления плёнки [10, 11], который широко применяется для контроля толщины диэлектрических покрытий различного назначения.

Важной задачей является определение зависимости погрешности предложенного метода измерения от ошибок изготовления решётки и систематических ошибок измерительной спектрофотометрической установки.

Влияние скважности решётки на погрешность измерений. Дифракционная эффективность бинарной линейной решётки в нулевом порядке дифракции (DE_0) описывается выражением [12]

$$DE_0 = Q^2 + (1 - Q)^2 + 2Q(1 - Q) \cos \varphi, \quad (3)$$

где $Q = d/T$ — скважность решётки с периодом T ($T \gg \lambda$) и шириной канавки d ; $\varphi = \pi H/\lambda$ — фазовый сдвиг, определяемый глубиной H канавок решётки. Из формулы видно, что спектральное положение экстремумов этой функции и результат измерения глубины не зависят от скважности решётки.

Влияние трапецидальности профиля решётки. На практике сложно сделать бинарную фазовую решётку с вертикальными границами канавок. Особенно это проблематично при большой глубине канавок и небольшом периоде. Нами проведено моделирование DE_0 отражательной решётки с периодом 10 мкм и глубиной 2,4 мкм с использованием демонстрационной версии программы PCGrate [13], работающей в рамках точной теории дифракции на основе метода анализа согласованных волн (RCWA — Rigorous Coupled Wave Analysis). В модели решётка выполнена из плавленого кварца и покрыта плёнкой хрома толщиной 50 нм, что соответствовало нашим экспериментальным решёткам. Угол наклона

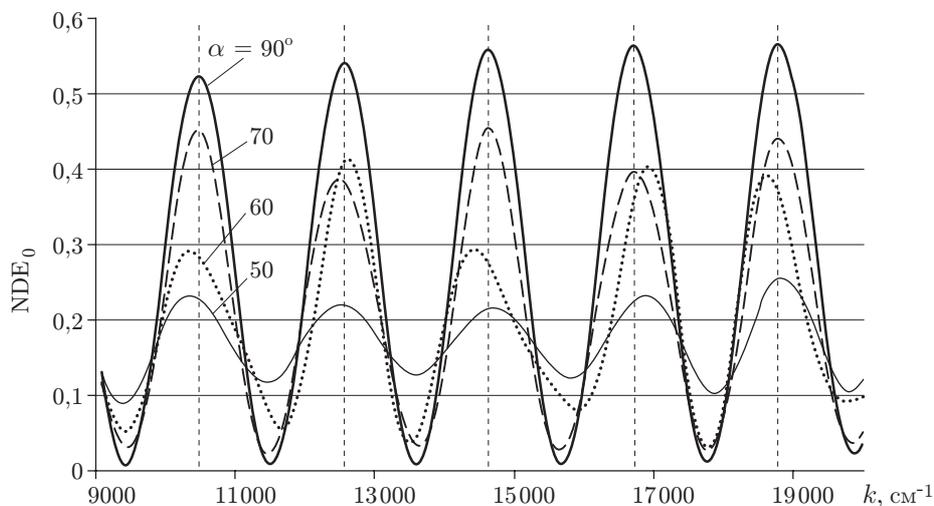


Рис. 2. Расчётная спектральная зависимость NDE_0 при различных углах наклона стенок канавок решётки с глубиной 2,4 мкм и периодом 10 мкм

боковых сторон канавки по отношению к исходной поверхности подложки изменялся от 90° до 50° . Последнее фактически соответствует изотропному травлению. При моделировании ширина выступов, формируемых маскирующим покрытием, считалась неизменной, а ширина канавок, получаемых травлением, изменялась при уменьшении угла наклона стенок. Уменьшение величины NDE_0 и изменение положения максимумов в спектре становятся заметными при углах, меньших 70° (рис. 2). Наибольший сдвиг максимумов спектра при наклоне 70° не превышает $\pm 0,5\%$ от положения, соответствующего идеальной решётке, что приводит к такому же вкладу в ошибку определения глубины (1). Это вполне приемлемо для поставленной задачи. Но для угла 60° сдвиг достигает уже $1,5\%$. Таким образом, изотропное жидкостное или плазмохимическое травление не может быть использовано для формирования калибровочных решёток, измеряемых предлагаемым способом.

Влияние ошибок спектрофотометра. Рассчитаем аппаратные ошибки на примере работы спектрофотометра "Shimadzu UV-3600". Точность длины волны в приборе составляет $\pm 0,2$ нм в УФ- и видимом диапазонах и $\pm 0,8$ нм в ИК-диапазоне. Угол падения света при использовании приставки для измерения спектров отражения образцов по спецификации равен 5° . По формуле (2) максимальный вклад такой погрешности в итоговый результат составляет $0,1\%$ на длине волны 200 нм. Для спектрофотометров простого экономичного уровня ошибка установки длины волны достигает 0,8 нм в диапазоне 200–1100 нм. Но даже при такой ошибке вклад спектрофотометра в погрешность измерения не превысит $0,4\%$ по формуле (2).

Влияние покрытия отражающей решётки. Как правило, в качестве покрытия для решёток используют три металла: Al, Cr, Au. Графики их спектров отражения показаны на рис. 3 [14]. Видно, что покрытие золотом не подходит для измерения предлагаемым методом в диапазоне длин волн от 400 до 600 нм. С точки зрения равномерности спектра отражения лучше всего подходит напыление алюминием. Но алюминий очень мягкий металл, поэтому нельзя использовать решётки с таким покрытием для калибровки контактных профилометров. Видимо, оптимальным является напыление на калибровочную решётку плёнки хрома, имеющей коэффициент отражения, слабо зависящий от длины волны, и механическую прочность, приемлемую для калибровки контактных профилометров. Спектральную зависимость отражения плёнки хрома можно также учесть путём нормировки измеренного спектра отражения дифракционной решётки в нулевом порядке на спектр отражения, измеренный для такой же плёнки, нанесённой на плоскую поверхность.

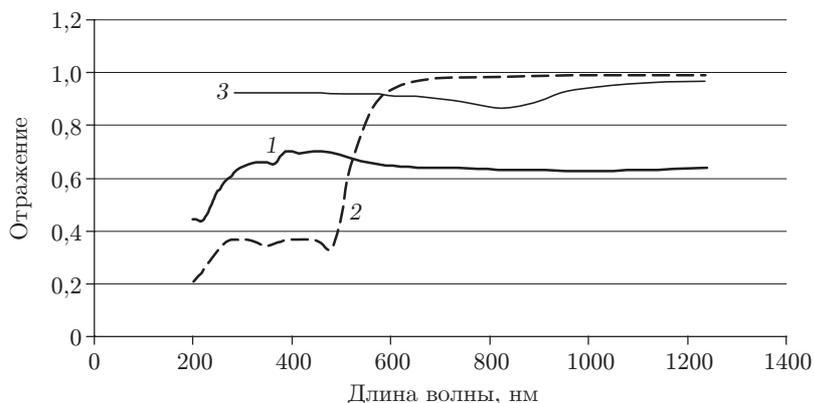


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициентов отражения различных металлов: кривая 1 — хром, 2 — золото, 3 — алюминий

Экспериментальная апробация метода. Для проведения экспериментов использовался одноканальный спектрофотометр "UNICO-2800". Так как этот спектрофотометр измеряет спектр пропускания, а не отражения, то в него была встроена система зеркал, позволяющая измерять спектр отражённого от образца света (рис. 4). Перед первым зеркалом расположена отрицательная линза для коррекции сходимости светового пучка, минимизации площади измеряемого участка и повышения интенсивности света на фотоприёмнике. На выходе измерительного отсека спектрофотометра установлена диафрагма, позволяющая уменьшить влияние дифракционных порядков, отличных от нулевого, на спектр при малых углах дифракции.

Свет падал на образец под углом 8° от нормали к поверхности. Погрешность определения угла, возникающая за счёт расходимости пучка света, составила $\pm 0,5^\circ$, а её вклад в погрешность глубины, рассчитанной по формуле (2), — около 0,13 %.

Для тестирования метода использовались сертифицированные калибровочные решётки TGZ-11 и TGZ-03 с заявленными глубинами рельефа 1550 ± 30 нм и 484 ± 2 нм и периодами 10 и 3 мкм соответственно.

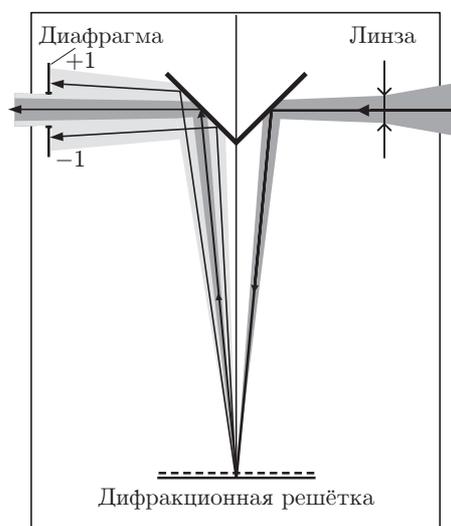


Рис. 4. Схема измерения спектра отражения на спектрофотометре "UNICO-2800"

Структура решёток сформирована в слое SiO_2 , нанесённом на кремниевую основу. Чтобы избежать эффекта интерференции в слое SiO_2 и дополнительного отражения от кремниевой подложки, решётки покрывались слоем хрома толщиной 50 нм.

Измеренный нормированный на максимум спектр отражения в нулевом порядке дифракции решётки TGZ-11 показан на рис. 1 (кривая 2). Наличие постоянного смещения сигнала фотоприёмника связано с тем, что скважность решётки была примерно 0,6 и глубина модуляции менее 100 %. Некоторое уменьшение глубины модуляции с увеличением волнового числа объясняется тем, что уменьшается угол дифракции, и часть света от высших дифракционных порядков начинает проникать в диафрагму (см. рис. 4).

Измеренная глубина для решётки TGZ-11 составила 1564 нм со среднеквадратичным отклонением 6 нм. При этом значение глубины, представленное производителем, равнялось 1550 ± 30 нм. Это значит, что наш результат лежит в интервале погрешности, данном производителем. Аналогичный результат получен для решётки TGZ-03. Графики спектра интенсивности отражённого нулевого порядка для этой решётки показаны на рис. 5. Измеренное значение глубины составило 481,5 нм со среднеквадратичным отклонением 2 нм при заявленной производителем 484 ± 5 нм.

Диапазон применимости метода. Важной задачей является определение диапазона глубин и периодов решёток, для измерения которых применим предлагаемый метод. Минимальная измеряемая глубина зависит от минимальной длины волны в рабочем диапазоне спектрофотометра. Для большинства современных приборов она составляет около 200 нм. Для сравнительно точного определения глубины рельефа необходимо наличие хотя бы трёх пиков интенсивности, самый коротковолновый из которых, предположим, соответствует 200 нм. С учётом выражения (1) для $m = 3$ и $\lambda = 200$ нм минимальная измеряемая глубина решётки (при падении света под углом, близким к нормали) составит 300 нм. При увеличении глубины измеряемой решётки разность длин волн между соседними максимумами уменьшается и становится заметным вклад погрешности определения длины волны спектрофотометром. Таким образом можно найти теоретический предел глубины решётки при измерении с заданной точностью. Для нашей экспериментальной установки погрешность определения длины волны составляет 0,8 нм и при измерении глубины с погрешностью не более 1 % разность длин волн соседних максимумов в длинноволновой части спектра должна быть не менее 80 нм. При максимальной длине волны 1100 нм

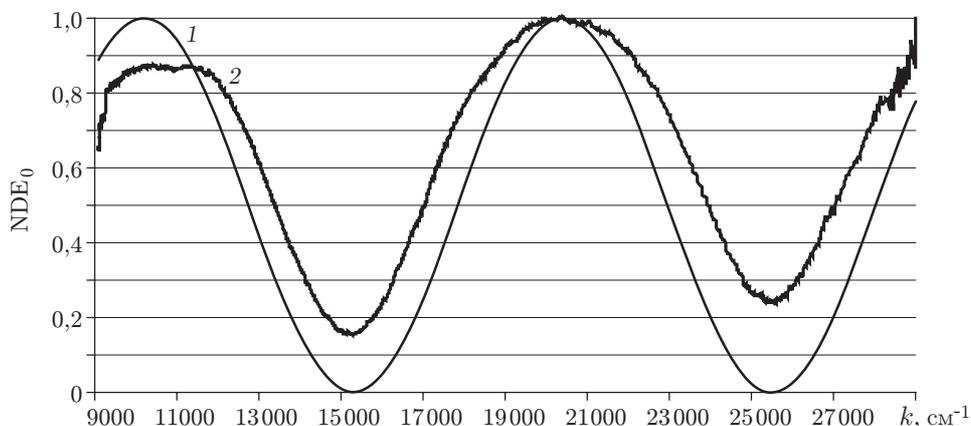


Рис. 5. Зависимость NDE_0 от волнового числа падающего излучения: кривая 1 — результат моделирования решётки с глубиной 486 нм, 2 — экспериментальные данные для решётки TGZ-03

получаем

$$\Delta k = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{1100} - \frac{1}{1020} \approx 713 \text{ см}^{-1},$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, соответствующие соседним максимумам в длинноволновой части спектра. Тогда по формуле (2) теоретический максимум глубины решётки, измеряемой предложенным методом на нашей установке, составит около 7 мкм. Для повышения этого предела необходимо переходить дальше в ИК-диапазон.

Отдельной задачей является определение диапазона периодов, в рамках которого применим метод. В области малых периодов ограничением является эффект затенения за счёт неперпендикулярного падения света на образец и переотражения дифрагировавших пучков от стенок канавок глубокой решётки. Моделирование дифракционной картины для этого крайнего случая требует привлечения точной теории дифракции. На практике нами была показана применимость метода для решёток с периодом 2 мкм и глубиной около 0,7 мкм.

Для больших периодов ограничение может заключаться в том, что порядки, соседние с нулевым, могут проникать в окно диафрагмы (см. рис. 4) и уменьшать амплитуду модуляции сигнала. Однако при максимальной интенсивности нулевого порядка все остальные дифракционные порядки имеют малую интенсивность, и поэтому положение максимумов интенсивности в спектре не изменяется. Таким образом, эффект проникновения паразитных порядков в окно диафрагмы будет проявляться только в ухудшении условий определения положения максимумов при снижении контраста модуляции спектрального сигнала и усилении влияния шумов спектра. На рис. 6 изображена спектральная зависимость сигнала спектрофотометра, рассчитанная в рамках скалярной теории дифракции для схемы на рис. 4. Период моделируемой решётки 500 мкм, глубина 1 мкм, а для оценки степени влияния порядков были заданы параметры нашей установки: ширина диафрагмы 2 мм и расстояние от решётки до диафрагмы по траектории пучка света 200 мм. Видно, что амплитуда модуляции значительно превышает уровень шумов большинства спектрофотометров при измерении спектра отражения металлических плёнок, т. е. данный эффект не является для метода ограничением по величине периода. Но если падающий на измеряемую решётку световой пучок спектрофотометра будет освещать менее 5 периодов, то эффект перекрытия дифракционных порядков существенно усилится. В нашей установке ширина пятна света на образце составляет 3 мм и, следовательно, максимальный период измеряемой решётки равен 600 мкм.

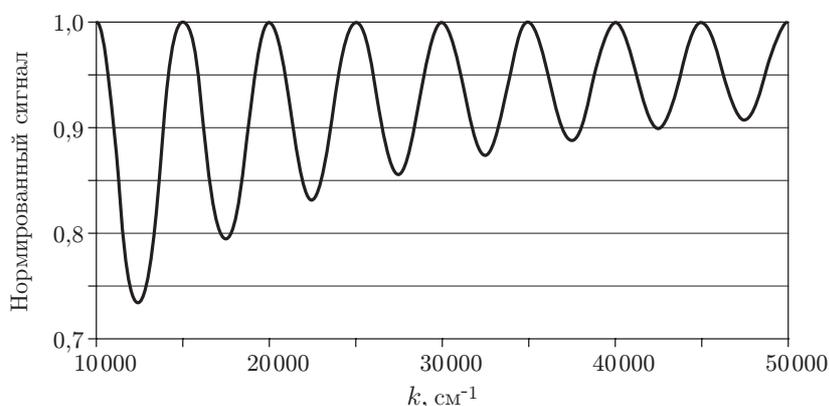


Рис. 6. Расчётная спектральная зависимость сигнала спектрофотометра в схеме на рис. 4 для решётки с периодом 500 мкм и глубиной 1 мкм

Заключение. Предложенный в данной работе спектрофотометрический метод измерения глубины калибровочных решёток по точности сравним с существующими методами измерения калибровочных структур, в то же время достаточно прост и не требует больших материальных затрат. Данный метод теоретически обоснован и экспериментально апробирован на промышленно выпускаемых сертифицированных калибровочных решётках серии TGZ. Измерение глубины таких решёток предложенным методом дало значения, лежащие в диапазонах погрешностей, указанных производителем.

Общий бюджет ошибок метода состоит из трёх основных компонент: смещения максимумов спектра из-за наклона стенок канавок решётки, ошибки задания длины волны спектрофотометра и расходимости пучка света в установке. При наихудшем варианте наклона стенок 70° и использовании простого одноканального спектрофотометра суммарная ошибка составит 1 %. В наилучшем варианте для решёток с вертикальными стенками и при использовании спектрофотометра "Shimadzu UV-3600" погрешность теоретически может не превысить 0,25 %, что не уступает существующим методикам измерения калибровочных решёток с помощью высокопрецизионных профилометров. По быстродействию и простоте подготовки образцов к измерению метод превосходит существующие оптические профилометры и атомно-силовые микроскопы, используемые для измерения глубины бинарных решёток. Также метод может быть применён при разработке автоматизированного прибора для контроля глубины бинарных дифракционных оптических элементов путём пошагового локального измерения спектра отражения дифракционной структуры в нулевом порядке по всей поверхности элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Optical Shop Testing** /Ed. D. Malacara. N. Y.: Wiley & Sons, 2007. 888 p.
2. **Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В. и др.** Интерференционный микроскоп-профилометр // *Автометрия*. 2010. **46**, № 2. С. 119–128.
3. **Gate J. W.** Fringe spacing in interference microscopes // *Journ. Sci. Instrum.* 1956. **33**, N 12. P. 507.
4. **Sheppard C. J. R., Larkin K. G.** Effect of numerical aperture on interference fringe spacing // *Appl. Opt.* 1995. **34**, N 22. P. 4731–4734.
5. **Dimensional Products** — Step Height Standards (Quartz) // Каталог компании "VLSI Standards". URL: <http://www.vlsistandards.com/products/dimensional/step.asp?SID=100> (дата обращения: 08.02.2012).
6. **Koenders L.** WGDM-7: Preliminary comparison on nanometrology, Nano2: Step height standards. Final Report. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2003. 77 p.
7. **Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range** /Eds. G. Wilkening, L. Koenders. Wiley-VCH, 2005. 541 p.
8. **Test structures** — TGZ Series // Каталог бинарных калибровочных структур компании "MikroMasch". URL: <http://www.spmtips.com/tgz> (дата обращения: 08.02.2012).
9. **Досколович Л. Л., Сойфер В. А.** Многопорядковые ДОО // *Дифракционная компьютерная оптика* /Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. С. 254–297.
10. **Быстров Ю. А., Колгин Е. А., Котлецов Б. Н.** Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.: Радио и связь, 1988. 165 с.
11. **Hind A. R., Chomette L.** The determination of thin film thickness using reflectance spectroscopy // Электрон. б-ка компании "Agilent". URL: <http://www.chem.agilent.com/Library/applications/uv90.pdf> (дата обращения: 08.02.2012).

12. **Poleshchuk A. G.** Diffractive light attenuators with variable transmission // Journ. Modern Opt. 1998. **45**, N 7. P. 1513–1522.
13. **International Intellectual Group, Inc.** // Сайт разработчика программного обеспечения. URL: <http://www.pcgrate.com> (дата обращения: 08.02.2012).
14. **Weber M. J.** Handbook of Optical Materials. CRC Press, 2003. P. 325–333.

Поступила в редакцию 6 февраля 2012 г.
