

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ РЕШЕТКИ С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ

Досколович Л.Л.¹, Кадомина Е.А.², Кадомин И.И.²¹ Институт систем обработки изображений РАН,² Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

Аннотация

Рассмотрены методы решения задачи рефлектометрии для дифракционной решетки с трапецеидальным профилем. Представлен метод решения, основанный на использовании нейронной сети и гибридный метод, основанный на поиске по таблице с последующей оптимизацией. Приведенные результаты исследования свидетельствуют о высокой точности методов.

Введение

При изготовлении периодических дифракционных структур актуальной является проблема контроля геометрических параметров этих структур. Одним из наиболее перспективных методов контроля является оптическая рефлектометрия. Метод рефлектометрии состоит в определении геометрических параметров исследуемой структуры по отклику на сканирующее излучение. При этом параметры сканирующего излучения (длина волны, поляризация, угол падения на исследуемую структуру) меняются в процессе исследования структуры.

Оптическая рефлектометрия является не только быстрым бесконтактным методом неразрушающего контроля, но и соответствует высоким требованиям точности, налагаемым современными технологиями [1-6].

Рефлектометрия позволяет оценивать одновременно несколько геометрических параметров профиля дифракционной решетки. В [1-3] рассмотрены методы субволновой рефлектометрии для трапецеидальной дифракционной решетки (рис.1) с использованием нейронных сетей. Точность определения параметров трапецеидального профиля в [1-3] составляет около 1° для угла наклона боковых сторон и около 1 нм для ширины и высоты трапеции.

В данной статье также рассматривается трапецеидальная решетка с тремя параметрами. Для определения параметров трапецеидального профиля предложено два метода: гибридный метод, использующий метод оптимизации и нейронная сеть. Точность предложенных методов значительно выше, чем в [1-3]. Оба рассмотренных метода решения задачи рефлектометрии для трапецеидальной решетки основаны на строгом решении прямой задачи дифракции методом связанных волн (rigorous coupled wave analysis – RCWA) [7-12].

Постановка задачи

Профиль симметричной дифракционной решетки с клином травления описывается равнобедренной трапецией (рис.1). Такой профиль однозначно описывается тремя параметрами: длиной нижнего основания p , высотой решетки h и углом между боковой стороной и высотой α . Полагая, что период решетки (d) и показатели преломления материалов решетки и подложки остаются неизменными, задача определе-

ния параметров профиля решетки сводится к нахождению тройки параметров (h, p, α) по сигнатуре.

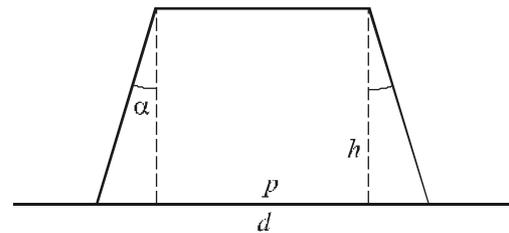


Рис.1 – Параметры решетки с трапецеидальным профилем

Под сигнатурой будем понимать значения коэффициента отражения от дифракционной решетки (интенсивность нулевого отраженного порядка) в зависимости от параметров падающей плоской волны (угла наклона, поляризации, длины волны). Сигнатура, в свою очередь, зависит от параметров (h, p, α) дифракционной решетки.

Длина сигнатуры (количество измерений) зависит от параметров задачи и метода её решения и подбирается опытным путем.

Гибридный метод

Предложенный метод представляет собой комбинацию методов поиска по таблице и метода оптимизации.

Поиск по таблице заключается в следующем. Область допустимых значений параметров (h, p, α) покрывается равномерной сеткой с определенным по каждому параметру шагом Δ_i , где $i = h, p, \alpha$. В каждом узле сетки $(h, p, \alpha)^k$ рассчитывается соответствующая сигнатура S^k , где $k = 1..K$, K – количество сигнатур и соответствующих им параметров. Таким образом, формируется «таблица» параметров структуры и их сигнатур.

При сканировании исследуемой структуры получают сигнатуру \tilde{S} . По таблице производится поиск ближайшей к ней сигнатуры и соответствующей тройки параметров (h, p, α) по критерию

$$f(S^k, \tilde{S}) \rightarrow \min_k, \quad f(S^k, \tilde{S}) = \max_n |S_n^k - \tilde{S}_n|, \quad (1)$$

где S^k – сигнатура, расположенная в таблице, \tilde{S} – заданная сигнатура, $n = 1, \dots, M$, M – длина сигнатуры. Поиск по таблице происходит достаточно быстро, однако, точность результатов не может быть лучше, чем $\Delta_i/2$, $i = h, p, \alpha$. На практике же точность оказывается в 4–5 раз хуже из-за того, что близость сигнатур еще не означает близости параметров структур. Для достижения высокой точности необходимо уменьшать Δ_i , что увеличивает размер таблицы и замедляет поиск.

Другим методом определения параметров по сигнатуре может быть использование оптимизационной процедуры. Из большого числа методов оптимизации был выбран метод главных осей (principal axis method), не использующий знание о градиенте функции. Основными его достоинствами являются квадратичная сходимость в окрестностях минимума, а также способность находить минимум функции овражного вида за счет аппроксимации дна оврага кривой второго порядка и шагов в случайных направлениях.

В качестве критерия оптимальности (целевой функции) выбрано среднеквадратическое отклонение:

$$f_2(S^k, \tilde{S}) \rightarrow \min_k,$$

$$f_2(S^k, \tilde{S}) = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (S_i^k - \tilde{S}_i)^2}, \quad (2)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i,$$

где \tilde{S} – заданная сигнатура, а S^k – искомая, ближайшая к \tilde{S} по критерию (2), сигнатура.

В методе главных осей, как и во многих других алгоритмах минимизации, необходимо задавать начальную точку, из которой будет проводиться поиск минимума целевой функции. Выбор начальной точки является сложной задачей, определяющей эффективность и скорость сходимости метода. В работе предложен гибридный метод, объединяющий в себе поиск по таблице и процедуру оптимизации. Механизм гибридного метода заключается в следующем. Сначала по таблице находится ближайшая по критерию (1) сигнатура и соответствующая ей тройка параметров (h_0, p_0, α_0) . Эта тройка параметров передается процедуре оптимизации в качестве начальной точки. Для улучшения результата можно последовательно передавать несколько начальных точек, соответствующих сигнатурам наиболее близким по критерию (1), от которых запускать оптимизирующую процедуру, выбирая из результатов тот, у которого значение функционала наименьшее. Такой прием позволяет избежать локальных минимумов. При использовании гибридного метода достигается на порядок более высокая точность, чем при поиске по таблице. Указанный выбор начального

приближения обеспечивает высокую точность оценки параметров.

Рассмотрим результаты работы гибридного метода на примере трапецидальной решетки из кремния на кремниевой подложке. Будем считать, что искомые параметры профиля решетки лежат в следующих пределах: $h \in [310; 340]$ нм, $p \in [86; 106]$ нм, $\alpha \in [1; 5]^\circ$. Для получения сигнатур используем следующие параметры освещающего пучка: поляризация постоянная – ТМ, угол падения постоянный – 71° , длина волны переменная – от 300 до 900 нм. Для расчета таблицы сигнатур была использована сетка с шагами 4 нм по параметрам h и p и 0.4° по параметру α . В процесс расчетов было установлено, что для достижения высокой точности решения задачи (выше 0.1 нм) число длин волн при расчете сигнатур должно быть 15–20. В данном примере использовалось 18 длин волн в указанном диапазоне.

Для оценки рабочих характеристик метода использовалась следующая схема численного эксперимента. Сначала генерируется некоторое количество троек параметров (h', p', α') , лежащих в заданных пределах, после чего рассчитываются сигнатуры с использованием метода RCWA [7-12]. По этим сигнатурам гибридным методом восстанавливаются параметры (h, p, α) , которые сравниваются с исходными параметрами (h', p', α') . По результатам сравнения троек параметров (h, p, α) и (h', p', α') оценивается точность определения параметров.

Приведем результаты работы на 200 случайных точках для ТМ-поляризации при поиске по трем начальным точкам, наиболее близким по критерию (1). На рисунках 2–4 на оси абсцисс располагаются номера испытаний в численном эксперименте, а на оси ординат – абсолютное отклонение соответствующего параметра.

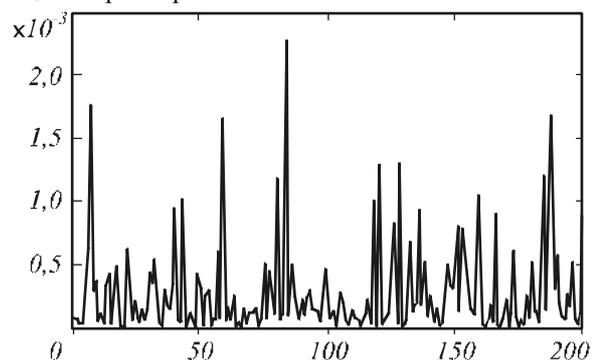


Рис. 2 – Абсолютное отклонение (в нм) сгенерированного параметра h от найденного

Результаты (рис. 2–4) свидетельствуют о высокой точности гибридного метода, ошибка определения параметров пренебрежимо мала. Однако при такой высокой точности данный метод обладает недостатком – относительно большим временем поиска параметров (несколько секунд). Это ограничивает

область применения метода для задач оценки параметров в реальном времени.

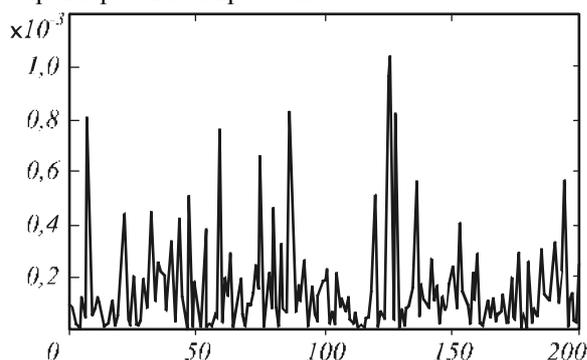


Рис.3 – Абсолютное отклонение (в нм) сгенерированного параметра p от найденного

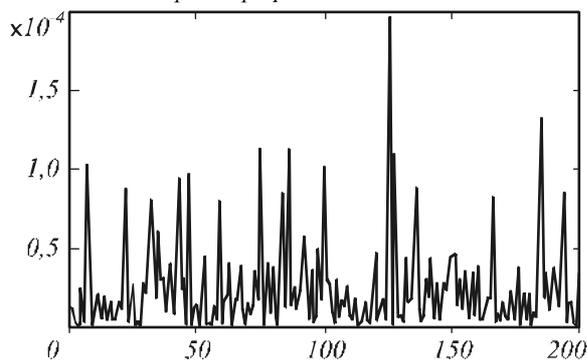


Рис.4 – Абсолютное отклонение (в градусах) сгенерированного параметра α от найденного

Нейронная сеть

Одним из способов быстрого решения задачи может быть использование нейронной сети [1-3]. Нейронные сети привлекательны тем, что основная вычислительная нагрузка приходится на этап обучения сети. Вычисление же выхода обученной сети происходит очень быстро, особенно при аппаратной реализации, что делает нейронные сети удобным инструментом для решения задач в режиме реального времени.

Задачу нахождения тройки параметров (h, p, α) по известной сигнатуре можно рассматривать как задачу классификации набора входных векторов (сигнатур). При решении такого типа задач с помощью нейронных сетей применяются сети типа «многослойный персептрон». Для нашей задачи выбран персептрон с количеством входных нейронов равным количеству точек в сигнатуре, и число выходных нейронов, равным количеству определяемых параметров. Число нейронов на скрытом слое подобрано экспериментально и равно 20. Схематично вид сети представлен на рис. 5.

В качестве активационной функции нейронов использовался логистический сигмоид. Обучение сети производилось методом Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt).

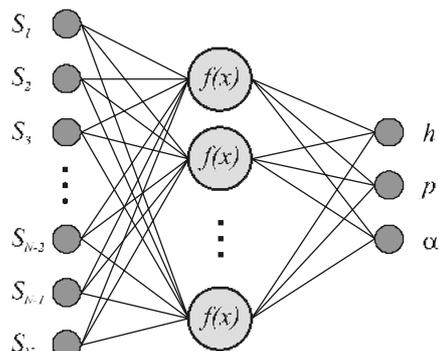


Рис.5 – Конфигурация используемой нейронной сети

Обучающее множество формировалось из сигнатур, соответствующих множеству троек параметров (h, p, α) сгенерированных случайным образом в заданном диапазоне. Для вышеуказанного примера $h \in [310; 340]$ нм, $p \in [86; 106]$ нм, $\alpha \in [1; 5]^\circ$. Число точек в сигнатуре (число измерений) было выбрано равным 20. Рисунки 6–8 демонстрируют результаты работы обученной сети на 200 случайных тройках (h, p, α) .

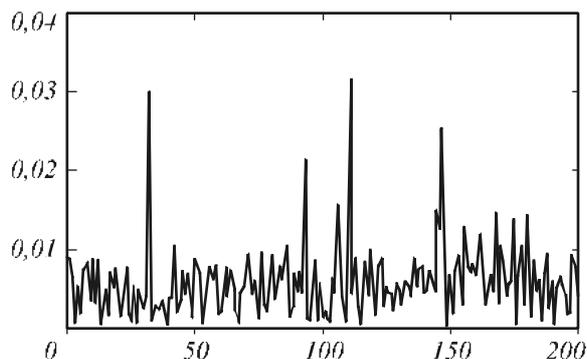


Рис.6 – Абсолютное отклонение (в нм) сгенерированного параметра h от найденного

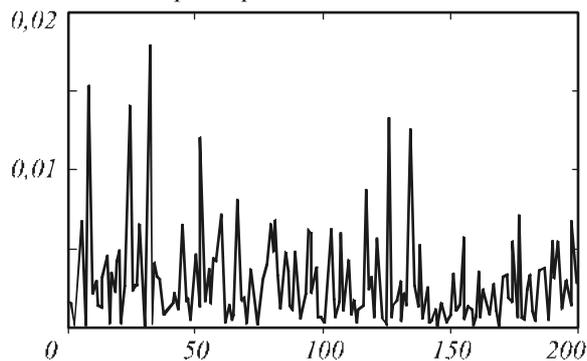


Рис.7 – Абсолютное отклонение (в нм) сгенерированного параметра p от найденного

Результаты (рис.6–8) свидетельствуют о том, что нейронная сеть также определяет параметры с высокой точностью, превышающий 0.1 нм. Такая точность превышает практически требования. Время решения задачи составляет десятые доли секунды, что на порядок ниже, чем у гибридного метода.

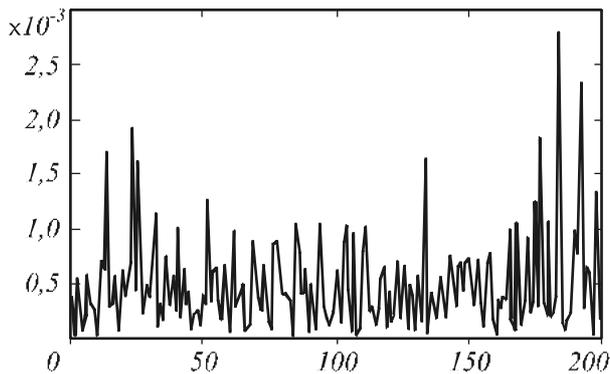


Рис.8 – Абсолютное отклонение (в градусах) сгенерированного параметра α от найденного

Заключение

Результаты численных экспериментов свидетельствуют о высокой точности предложенных методов при идентификации параметров структур по их сигнатурам. Точность нахождения линейных параметров превышает физически обоснованные требования.

Предложенные методы очевидным образом допускают обобщение на задачи идентификации профиля с большим числом параметров.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (“BRHE”), грантов РФФИ № 07-07-97601-р_офи, 07-01-96602-р_поволжье_а, 07-07-91580-АСП_а, 08-07-99005-р_офи и Фонда содействия отечественной науке.

Литература

1. Optical Scatterometry of Subwavelength Diffraction Gratings: Neural-Network Approach, Ilkka Kallioniemi, Jyrki Saarinen, and Erkki Oja, Applied Optics, Vol. 37, Issue 25, pp. 5830-5835 (1998)
2. Characterization of Diffraction Gratings in a Rigorous Domain with Optical Scatterometry: Hierarchical Neural-Network Model, Ilkka Kallioniemi, Jyrki Saarinen, and Erkki Oja, Applied Optics, Vol. 38, Issue 28, pp. 5920-5930 (1999)
3. Characterization of optical diffraction gratings by use of a neural method, Stéphane Robert, Alain Mure-Ravaud, and Dominique Lacour, JOSA A, Vol. 19, Issue 1, pp. 24-32 (2002).
4. Simplified optical scatterometry for periodic nanoarrays in the near-quasi-static limit, I. Abdulhalim, Applied Optics, Vol. 46, Issue 12, pp. 2219-2228 (2007)
5. Scatterometry, an optical metrology technique for lithography, Logofatu, P.C.; Apostol, D.; Damian, V.; Nascov, V.; Garoi, F.; Timcu, A.; Iordache, I., Semiconductor Conference, 2004. CAS 2004 Proceedings. 2004 International, Volume 2, Issue , 4-6 Oct. 2004 Page(s): 517 - 520 vol.2
6. P. C. Logofatu, S. A. Coulombe, B. K. Minhas, J.R. McNeil. Identity of the cross-reflection coefficients for symmetric surface-relief gratings // J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 16, N 5, pp. 1108-1114
7. M. Moharam, D.Pommet, E.Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // Journal of Optical Society of America A. -1995 - Vol.12, №5. - P.1077-1086.
8. Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // Journal of Optical Society of America A. - 1995. - Vol.12, №5. - P.1068-1076.
9. L. Li. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures // Journal of Optical Society of America A. - 1996. - Vol.13, № 9. - P.1870-1876.
10. S. Peng, G. M. Morris. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings // J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 12, No. 5, 1995, pp.1087-1096.
11. Lifeng Li. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors // J. Opt. A: Pure Appl. Opt., N 5, 2003, pp. 345-355
12. Lifeng Li. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings // J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 14, No. 10, 1997, pp.2758-2767.

SOLVING SCATTEROMETRY PROBLEM FOR TRAPEZOIDAL DIFFRACTION GRATINGS

L.L. Doskolovich¹, E.A. Kadomina², I.I. Kadomin²

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS,

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University

Abstract

New methods for solving a scatterometry problem for trapezoidal diffraction gratings are proposed. The presented method is based on a neural network technique using a hybrid method based on the table lookup searching technique with subsequent optimization. The proposed results demonstrate high accuracy of these methods.

Keywords: optical scatterometry, diffraction grating, a neural network.

Acknowledgements: The work was supported within the framework of the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (BRHE), by the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 07-07-97601-r_ofi, 07-01-96602-r_povoljje_a, 07-07-91580-ASP_a, 08-07-99005-r_ofi) and by the Russian Science Support Foundation.

Citation: Doskolovich LL, Kadomina EA, Kadomin II. Solving a scatterometry problem for trapezoidal diffraction gratings [In Russian]. Computer Optics 2008; 32(1): 29-32.

References

- [1] Kallioniemi I, Saarinen J, Oja E. Optical Scatterometry of Subwavelength Diffraction Gratings: Neural-Network Approach. Applied Optics 1998; 37(25): 5830-5835.
 - [2] Kallioniemi I, Saarinen J, Oja E. Characterization of Diffraction Gratings in a Rigorous Domain with Optical Scatterometry: Hierarchical Neural Network Model. Applied Optics 1999; 38(28): 5920-5930.
 - [3] Robert S, Mure-Ravaud A, Lacour D. Characterization of optical diffraction gratings by use of a neural method. JOSA A 2002; 19(1): 24-32.
 - [4] Abdulhalim I. Simplified optical scatterometry for periodic nanoarrays in the near-quasi-static limit. Applied Optics 2007; 46(12): 2219-2228.
 - [5] Logofatu PC, Apostol D, Damian V, Nascov V, Garoi F, Timcu A, Iordache I. Scatterometry an optical metrology technique for lithography. Semiconductor Conference 2004. CAS 2004 Proceedings International Oct. 2004; 2(4-6): 517-520.
 - [6] Logofatu PC, Coulombe S A, Minhas B K, McNeil JR. Identity of the cross-reflection coefficients for symmetric surface-relief gratings. J. Opt. Soc. Am. A; 16(5): 1108-1114.
 - [7] Moharam MG, Pommet DA, Grann EB. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. Journal of Optical Society of America A 1995; 12(5): 1077-1086.
 - [8] Moharam MG, Grann EB, Pommet DA, Gaylord TK. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. Journal of Optical Society of America A 1995; 12(5): 1068-1076.
 - [9] Li L. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures. Journal of Optical Society of America A 1996; 13(9): 1870-1876.
 - [10] Peng S, Morris GM. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings. J. Opt. Soc. Am. A 1995; 12(5): 1087-1096.
 - [11] Lifeng Li. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2003; 5: 345-355.
 - [12] Lifeng Li. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings. J. Opt. Soc. Am. A 1997; 14(10): 2758-2767.
-