

Волновой контроль периодического микрорельефа поверхности на основе дифракционного дескриптора

А. С. Мигель, С. В. Малый

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: anton.migel.99@mail.ru

Рассмотрена технология волнового контроля периодического микрорельефа поверхности на основе анализа дискретного спектра рассеянных электромагнитных волн. Показана возможность контроля параметров периодического микрорельефа на основе комбинации компьютерного моделирования и натурных измерений.

Ключевые слова: дифракционный дескриптор; контроль микрорельефа; численное моделирование.

Wave control of periodic surface microrelief based on diffraction descriptor

A. S. Migel, S. V. Maly

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: anton.migel.99@mail.ru

The technology of wave control of the periodic microrelief of the surface based on the analysis of the discrete spectrum of scattered electromagnetic waves is considered. The possibility of controlling the parameters of a periodic microrelief based on a combination of numerical modeling and full-scale measurement is shown.

Keywords: diffraction descriptor; microrelief control; numerical modelling.

Введение

Периодическая модуляция границы раздела двух сред с разными электромагнитными свойствами широко используется в устройствах оптического, инфракрасного, терагерцового и миллиметрового диапазонов, а также в технологиях фотолитографии [1]. Погрешности технологического и эксплуатационного характера могут приводить к изменению геометрических параметров границы и электромагнитных параметров, прилегающих к ней материалов. Поэтому технологии оперативного контроля параметров границ раздела с периодическим профилем, классификация дефектов и искажений является важной и актуальной проблемой.

На практике широко используются различные способы контроля микрорельефа плоских и слабо искривленных поверхностей [2]: контактная профилометрия, растровая электронная микроскопия, атомно-силовое зондирование и т. д. Основными недостатками данных способов являются значительные материальные и временные затраты на проведение измерений.

В данной работе исследованы потенциальные возможности бесконтактного контроля периодического микрорельефа на основе дифракционного дескриптора, представляющего собой комплексные амплитуды отраженных и (или) прошедших распространяющихся гармоник, возникающих при падении на границу плоской электромагнитной волны [3].

1. Методология

Предлагаемая методика диагностики базируется на дифракционном дескрипторе и включает в себя следующие основные этапы:

- формирование модели периодической решетки, представляющей собой границу раздела двух сред, профиль которой совпадает с «эталонной»;
- численное решение задачи дифракции плоской линейно поляризованной электромагнитной волны на дифракционной решетке;
- при заданных параметрах дифракционного спектра (количестве гармоник и направлениях их распространения) на вычислительной модели проводится оценка влияния параметров профилирования на комплексные амплитуды гармоник, выделяются гармоники, наиболее чувствительные к погрешностям;
- расчет дифракционного дескриптора для «эталонного» профиля;
- измерение амплитуды рассеянного на профилированной границе электромагнитного поля в направлениях, соответствующих рассчитанному дифракционному дескриптору;
- сравнительный анализ расчетного и измеренного дифракционных спектров с целью обнаружения погрешностей и их классификации.

2. Результаты численного моделирования

Апробацию описанной выше методики проведем на следующем примере:

- источник электромагнитной волны – гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632.8$ нм);
- ТМ-поляризованная электромагнитная волна падает нормально на профилированную поверхность;
- в качестве исследуемых моделей будем рассматривать периодические рельефные структуры из диэлектрика с показателем преломления $n = 1.2$. Варианты периодов решеток представлены на рис. 1.

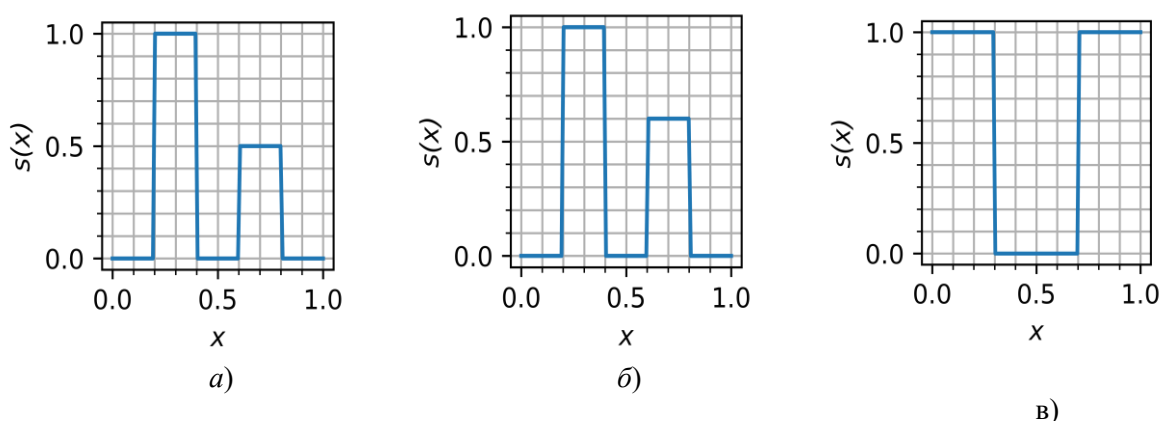


Рис. 1. Периоды решеток: а) эталон; б) образец № 1; в) образец № 2

Для расчета дифракционных спектров использовалась вычислительная модель на основе метода конечных элементов и теории периодических структур.

Ниже приведены результаты расчета дифракционных спектров для вариантов, когда отношение периода решетки к длине волны равно 3, 5 и 9.

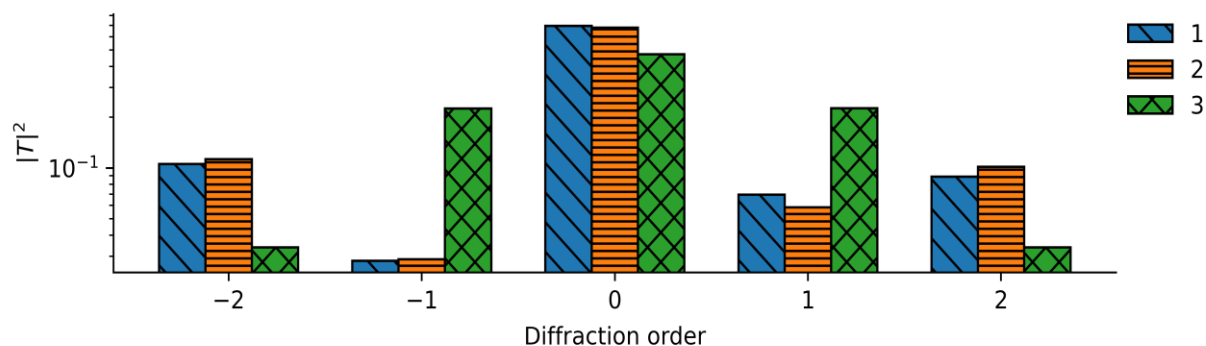


Рис. 2. Дифракционный спектр $d/\lambda = 3$: 1 – эталон; 2 – образец № 1; 3 – образец № 2

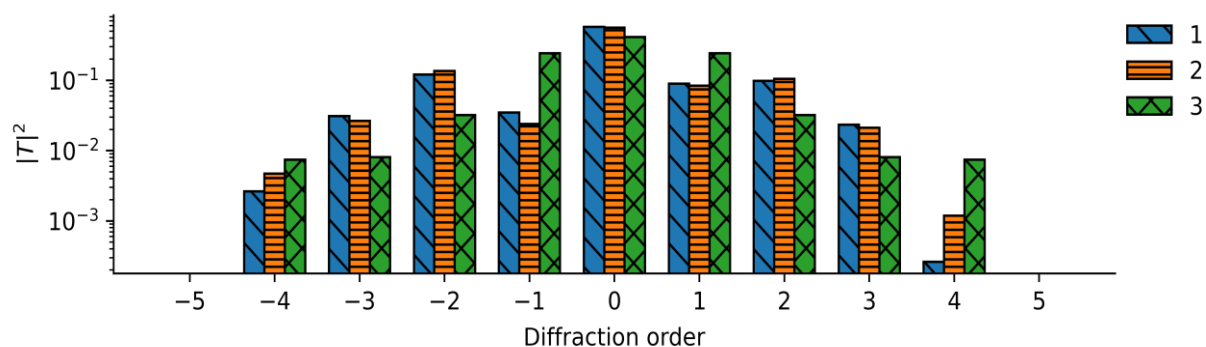


Рис. 3. Дифракционный спектр $d/\lambda = 5$: 1 – эталон; 2 – образец № 1; 3 – образец № 2

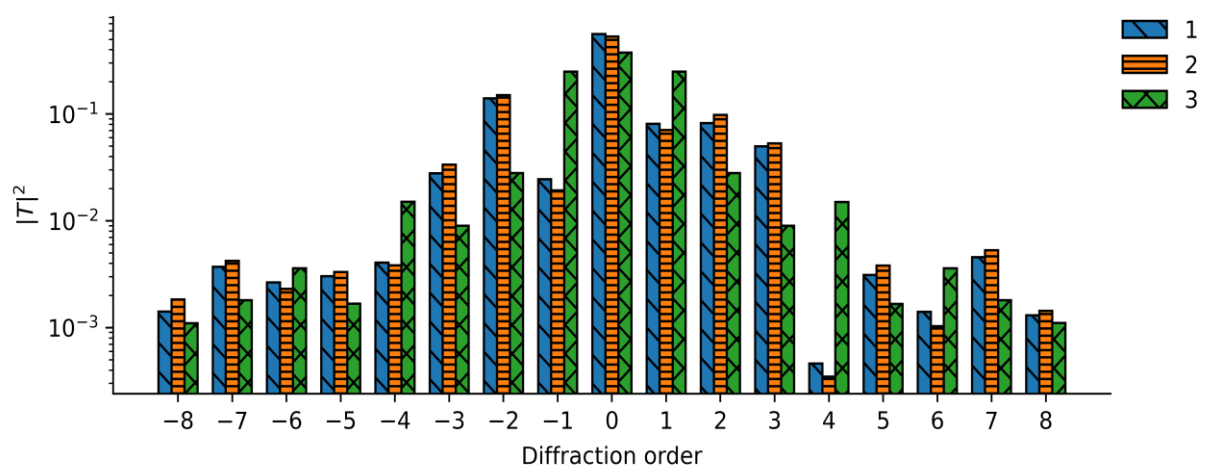


Рис. 4. Дифракционный спектр $d/\lambda = 9$: 1 – эталон; 2 – образец № 1; 3 – образец № 2

Из результатов вычислительного эксперимента следует, что спектр рассеянных гармоник, соответствующий образцу № 2, существенно отличается от спектров, соответствующих эталону и образцу № 1. Некоторые гармоники более чувствительны

к изменению рельефа решетки (для $d/\lambda = 3 \pm 1$ порядки, для $d/\lambda = 9 - \pm 1, \pm 4$ порядки), что позволяет их использовать для анализа микрорельефа, а не весь спектр.

Дифракционный дескриптор выступает как вектор признаков, который может включать как все гармоники для определенного отношения периода решетки к длине волны, так и наиболее чувствительные к изменению рельефа.

На базе вычислительного эксперимента может быть сформирован набор данных для обучения нейронной сети, предназначенной как для классификации периодических решеток с различной структурой, так и для анализа типа и величины дефектов для решетки, заданной геометрии и материального состава.

Заключение

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что дифракционные дескрипторы обладают большой гибкостью, адаптированной чувствительностью и могут использоваться для классификации периодических решеток и контроля качества их изготовления по сравнению с эталонными.

Волновой контроль периодического рельефа границ раздела с помощью дифракционного дескриптора обеспечивает возможность проведения оперативного анализа элементов устройств оптического, инфракрасного и терагерцового диапазонов.

Указанный подход к диагностике может использоваться для контроля поверхностей с двумерно периодическим рельефом.

Библиографические ссылки

1. Дифракционная оптика и нанофотоника / Под ред. В.А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 608 с.
2. Каминская Т. П. Исследование рельефа пленочных дифракционных оптических элементов / Т. П. Каминская, В. В. Попов, А. М. Салецкий // Компьютерная оптика. 2016. № 40. С. 215 – 224.
3. Maly S. V., Liventseva M. M. Diffraction analysis of ECG // MEDICON and HEALTH ELEMATICS 2004 "Health in the Information Society": Xth Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering, 2004.