

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБВОЛНОВЫХ АНТИОТРАЖАЮЩИХ СТРУКТУР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

С.С. Ермаков¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: ermakov_ss@inbox.ru

Аннотация

Предложен метод оценки влияния технологических погрешностей на оптические характеристики субволновых антиотражающих структур. Расчёт спектров пропускания выполнен на основе теории эффективных сред и метода матриц переноса. Погрешности учтены статистическим моделированием и аппроксимацией профиля. Показано изменение пропускания при учёте технологических ошибок. Метод предназначен для проектирования антиотражающих структур пассивных элементов высокомошной терагерцовой промышленной оптики.

Ключевые слова: антиотражающие структуры, терагерцовая оптика, статистическое моделирование.

Введение

Антиотражающие структуры представляют собой периодический субволновый микрорельеф, формирующий плавный градиент эффективного показателя преломления на границе раздела сред [1]. Такой микрорельеф, зачастую формируемый из материала применяемой оптической поверхности, позволяет добиться эффективного снижения френелевского отражения в широких диапазонах длин волн и углов падения излучения [1]. Особую актуальность антиотражающие структуры приобрели в терагерцовой оптике в связи с необходимостью снижения френелевских потерь в элементах систем передачи и формирования высокомошного терагерцового излучения, используемых в спектроскопии, неразрушающем контроле и промышленной обработке материалов. Реализация таких структур стала возможной благодаря развитию методов формирования субволнового микрорельефа, таких как лазерное микроstructuring [2] и реактивно-ионное травление с индуктивно-связанной плазмой [3].

Несмотря на значительный прогресс в технологиях формирования микрорельефа, очевидно, что получение строго периодических субволновых структур с постоянными геометрическими параметрами является нетривиальной задачей даже в длинноволновой области спектра. Всякая технологическая реализация непременно будет сопряжена с внесением искажений в форму профиля, а также неравномерностью распределения высоты, ширины и периода структур на оптической поверхности [3]. Однако, ввиду возможности быстрого расчёта параметров структур, основанной на применении аналитических выражений теории эффективных сред и локальных оптимизационных

процедур [1], существуют способы учёта возможных технологических искажений профиля и параметров антиотражающих структур ещё на этапе их проектирования.

В настоящей работе предложен метод для оценки влияния технологических погрешностей изготовления на оптические характеристики субволновых антиотражающих структур.

1. Технологии формирования субволновых антиотражающих микрорельефов

В терагерцовом диапазоне распространены две группы технологий создания субволновых антиотражающих микрорельефов: плазмохимические методы травления и методы прямой лазерной записи. В рамках данной работы рассмотрены две наиболее характерные технологии из этих групп, а именно реактивно-ионное травление с индуктивно-связанной плазмой (ICP-RIE) и фемтосекундное лазерное микроstructuring (ФЛМ).

ICP-RIE представляет собой анизотропное травление под действием плазмы высокой плотности с использованием газовых смесей на основе SF_6 , O_2 и C_4F_8 . В работах [3,4] показано, что данный метод позволяет формировать регулярные массивы микроstructures с высокой степенью однородности и контролируемой геометрией профиля. За счёт направленности ионной бомбардировки в ряде случаев удаётся получать структуры с углом наклона стенок, близким к вертикальному ($81\text{--}89^\circ$). [4]. Однако в большинстве случаев для данного метода характерно формирование положительного наклона из-за чего форма структур будет стремиться к трапециoidalной [3]. Точность воспроизведения ширины структур обычно составляет 1-8% [4], что чаще всего связывают с нарушением баланса между процессами химического травления и пассивации. Допуск на глубину обычно также не превышает 5%, однако в ряде случаев, особенно при значительном аспектном соотношении или большой толщине подложки, он может достигать 18–20% [4].

Фемтосекундное лазерное микроstructuring основано на прямом удалении материала оптической поверхности ультракороткими лазерными импульсами. Метод отличается возможностью обработки как плоских, так и криволинейных поверхностей без использования масок. Угол наклона структур может варьироваться от 60° до 85° и форму профиля получаемых структур можно описать гауссовой кривой, соответствующей распределению интенсивности применяемого лазерного пучка. Допуски геометрических параметров у данного метода в среднем выше, чем у ICP-RIE, и сильно зависят от позиционирования, стабильности и мощности импульса. Наиболее типовыми можно назвать значения 10-20%, как показано в работах [2, 5].

2. Процедура оценки оптических характеристик микрорельефа с учётом технологических погрешностей изготовления

Для количественной оценки влияния технологических погрешностей на оптические характеристики антиотражающих структур были рассчитаны спектры пропускания плоскопараллельной кремниевой пластины ($n = 3,42$) толщиной 5 мм с двусторонним субволновым микрорельефом. Расчёты проводились в диапазоне длин волн 100–1500 мкм для углов падения от 0° до 60° с шагом в 5° .

В основе модели лежит комбинация теории эффективных сред второго порядка и метода матриц переноса. В качестве идеальной структуры использовался бинарный прямоугольный профиль. Технологические искажения формы профиля учитывались путём многоуровневой аппроксимации идеального профиля путём ввода набора равных по высоте слоёв с эффективным показателем преломления, определяемым локальным коэффициентом заполнения. Задание формы профиля осуществлялось через модификацию закона изменения фактора заполнения вдоль высоты структуры.

Технологические допуски моделировались методом Монте-Карло путём варьирования высоты, ширины основания и периода структур с учётом типичных значений из литературы [2–5]. На рисунке 1 показана зависимость пропускания на целевой длине волны $\lambda = 141$ мкм от угла падения, а агрегированные метрики по всему диапазону углов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения агрегированных метрик на угловом диапазоне 0-60°

Метрика	Идеальная структура	ICP-RIE	ФЛМ
$\langle T \rangle$, %	62,47	62,26	62,82
$T(\lambda = 141 \text{ мкм})$, %	75,47	64,05	66,47

Результаты из таблицы 1 показывают, что введение технологических погрешностей изготовления фактически приводит к переходу от строго периодической структуры к квазипериодической. Как показано в работе [6], квазипериодичность приводит к сглаживанию спектральных и угловых зависимостей, что уменьшает чувствительность к углу падения и обеспечивает более равномерное пропускание в широком диапазоне. Данный эффект наиболее выражен для технологии лазерного микроструктурирования, характеризующейся большими вариациями параметров, что объясняет небольшой рост агрегированного среднего пропускания (0,35 %) по сравнению с идеальной структурой.

Стоит отметить, что ввиду разрушения оптимального интерференционного согласования, характерного для строго периодической структуры, пропускание на целевой длине волны (рисунок 1) для случая нормального падения значительно уменьшается (-20,23 % для ICP-RIE и -15,73% для ФЛМ).

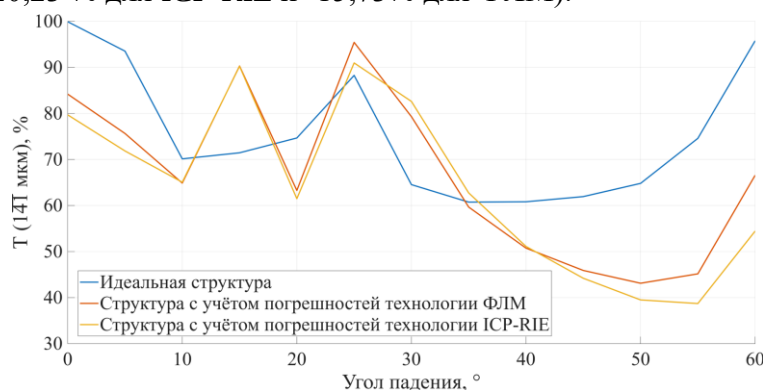


Рисунок 1 – Зависимость пропускания на целевой длине волны от угла падения излучения

Заключение

Результаты работы демонстрируют, что технологические погрешности, обычно рассматриваемые исключительно как негативный фактор, в действительности могут

способствовать формированию квазипериодических структур с улучшенной широкополосностью и угловой устойчивостью при некотором снижении пикового пропускания. Предложенный статистически-аналитический метод позволяет количественно учитывать этот эффект на этапе проектирования и оптимизировать геометрию рельефа под конкретную технологию изготовления.

Список использованных источников

1. Sondergaard, T. Guidelines for 1D-periodic surface microstructures for antireflective lenses / T. Sondergaard, J. Gadegaard, P.K. Kristensen [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – P. 26245–26258.
2. Femtosecond-laser-fabricated periodic tapered structures on a silicon substrate for terahertz antireflection / X. Yu, M. Ohta, N. Takizawa [et al.] // *Applied Optics*. – 2019. – V. 58. – № 35. – P. 9595–9602.
3. Schmelz, D. Stochastic antireflection structures on silicon fabricated by reactive ion etching / D. Schmelz, T. Käsebier, U. Zeitner // *The European Physical Journal Conferences*. – 2023. – V. 287. – P. 05026.
4. Fabrication of Anti-Reflective Composite Structures on Inverted Pyramids Using Inductively Coupled Plasma Etching / Z. Fan, L. Xu, B. Zhou, T. Chen // *Micromachines*. – 2025. – V. 16, № 5. – PC. 1–13.
5. Antireflection microstructures on ZnSe for mid- and far-IR fabricated by femtosecond laser ablation assisted with wet chemical etching / A. Teslenko, T. Konstantinova, A. Bushunov [et al.] // *Scientific Reports*. – 2024. – V. 14, № 1. – P. 1–9.
6. Feigenbaum, E. Optical modeling of random anti-reflective meta-surfaces for laser systems applications / *Applied Optics*. – 2019. – V. 58. – № 27. – P. 7558–7565.

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL ERRORS IMPACT ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF SUBWAVELENGTH ANTIREFLECTIVE TERAHERTZ STRUCTURES

S.S. Ermakov¹

¹*Samara University, Samara
e-mail: ermakov_ss@inbox.ru*

Abstract

A method is proposed for evaluating the impact of manufacturing tolerances on the optical properties of subwavelength antireflection microstructures in the terahertz range. Transmission spectra are calculated using effective medium theory and the transfer matrix method. Fabrication errors are accounted for through statistical modeling and profile approximation. Changes in transmission due to technological imperfections are demonstrated. The method is intended for the design of antireflective structures for passive components in high-power terahertz industrial optics.

Keywords: antireflection structures, terahertz optics, statistical modeling.