

## РАСЧЁТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКО-ВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ

С.С. Ермаков

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара

**Ключевые слова:** антиотражающие структуры, теория эффективных сред, FDTD-моделирование

Разработка и изготовление оптических поверхностей с минимально возможным коэффициентом отражения является одной из ключевых задач современной оптики, наиболее актуальной при создании дисплеев [1], фотоэлементов [2], оптических локаторов [3] и, в особенности, лазерных технологических установок, осуществляющих лазерные резку и сверление [4,5]. Особенностью последней группы приложений являются высокие мощности используемого лазерного излучения, ведущие, соответственно, к высоким абсолютным энергетическим потерям на френелевское отражение [4,5].

Использование интерференционных антиотражающих покрытий в устройствах фокусировки и деления пучка в таких установках ограничено ввиду высокого значения коэффициента объёмного теплового расширения плёнок, что в конечном итоге ведёт к нарушению их структуры и снижению антиотражающих свойств [6]. С подобной проблемой сталкиваются и биомиметические структуры с полимерной матрицей [7].

Субволновые структуры, формируемые непосредственно на поверхности оптического материала, лишены этого недостатка и зарекомендовали себя как эффективный способ увеличения коэффициента пропускания оптической поверхности [8].

Одной из трудностей использования антиотражающих структур является отсутствие развитых методов расчёта и оптимизации структур на оптических поверхностях сложной формы. Однако, методы теории эффективных сред позволяют провести расчёт субволновых структур на плоской оптической поверхности для разных типов поляризации [8,9], а положения теории просветляющих покрытий [10] позволяют провести коррективу, связанную с углом падения излучения.

В работе предложен новый алгоритм расчёта и оптимизации параметров субволновой структуры на сложной оптической поверхности, базирующийся на сегментации и аппроксимации последней.

Суть алгоритма заключается в разбиении исходной криволинейной поверхности на определенное количество равных сегментов, размер которых определяется числом периодов антиотражающей структуры,

необходимым для обеспечения достаточного пропускания выбранного излучения. Затем на каждом из сегментов формируется субволновая антиотражающая структура с рассчитанными под угол падения указанного излучения геометрическими параметрами.

Моделирование работы такой поверхности с учётом субволновых погрешностей изготовления уместно проводить в рамках строгой электромагнитной теории, а именно с помощью конечно-разностного расчёта во временной области Yee-схемы уравнений Максвелла [11].

В качестве демонстрационного примера, показывающего эффективность разработанного подхода, представлен расчёт, оптимизация и численное моделирование сегментированной кремниевой плоско-выпуклой линзы дальнего ИК-диапазона с субволновым антиотражающим рельефом.

#### Список использованных источников

1. Hoshino, T. Antireflective grating in the resonance domain for displays / T. Hoshino, M. Itoh, T. Yatagai // *Applied Optics*. – 2007. – vol. 46. – №5. – pp. 648 – 656.
2. Chee, K.W.A. Anti-reflective structures for photovoltaics: Numerical and experimental design / K.W.A. Chee, Z. Tang, H. Lu, F. Huang // *Energy Reports*. – 2018. – № 4. – pp. 266-273.
3. Dostovalov A. Hierarchical anti-reflective laser-induced periodic surface structures (LIPSSs) on amorphous Si films for sensing applications / A. Dostovalov, K. Bronnikov, V. Korolkov [and others] // *Nanoscale*. – 2020. – № 12. – pp. 13431 – 13441.
4. Busse, L.E. Review of antireflective surface structures on laser optics and windows / L.E. Busse, J.A. Frantz, B. Shaw [and others] // *Applied Optics*. – vol. 54. – № 31. – pp. 303-310.
5. Busse, L.E. Antireflective surface structures on optics for high energy lasers / L.E. Busse, C. M. Florea, L. B. Shaw, J. A. Frantz [and others] // *Solid State Lasers XXIII: Technology and Devices*. – 2014. – vol. 8959. – pp. 89591L-1 – 89591L-6.
6. Raut, H.K. Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review / H.K. Raut, V.A. Ganesh, A.S. Nair, S. Ramakrishna // *Energy and Environmental science*. – 2011. – vol. 4. – pp. 3779-3804.
7. Han, Z.W. Antireflective surface inspired from biology: A review / Z.W. Han, Z. Wang, X.M. Feng [and others] // *Biosurface and Biotribology*. – 2016. – vol. 2. – № 4. – pp. 137-150.
8. Raguin. D.H., Anti-reflection structured surfaces / D.H. Raguin, G. Michael Morris // *Optics and Photonics News*. – 1992. – vol. 3. – № 12. – pp. 33-33.
9. Sondergaard, T. Guidelines for 1D-periodic surface microstructures for antireflective lenses / T. Sondergaard, J. Gadegaard, P.K. Kristensen [and others] // *Optics Express*. – 2010. – vol. 18. – pp. 26245-26258.
10. Böntgen, T. Optical coatings – precision engineering on non-flat surfaces / T. Böntgen, M. Neufert, L. Jensen // *EPJ Web of Conferences*. – 2020. – vol. 238. – pp. 3-4.
11. Головашкин Д.Л., Анализ распространения излучения через фрагменты ДОО с технологическими погрешностями микрорельефа [Текст] / Д.Л. Головашкин // *Известия ШИЦ РАН*. – 2002. – том 4. – № 1. – С. 68-72.

Ермаков Сергей Сергеевич, аспирант каф. нанотехнологий, ermakov\_ss@inbox.ru.