

# Дифракционная эффективность пилообразных двухрельфных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции

Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Одной из общих задач голографии и дифракционной оптики является достоверный расчет дифракционной эффективности (ДЭ) микроструктуры. Наиболее достоверную оценку ДЭ в случае пилообразных рельефно-фазовых микроструктур с относительно низким (меньше двадцати) значением отношения периода дифракционной микроструктуры к высоте рельефа позволяет получить метод, основанный на решении системы уравнений Максвелла, в частности, строгим анализом связанных волн (RCWA). Оценить предельно достижимую ДЭ рельефно-фазовой микроструктуры RCWA-методом позволяет использование предложенной в докладе математической модели материала просветляющего покрытия плоских и рельефных рабочих поверхностей микроструктуры.

Установлена причина осциллирующего характера зависимости ДЭ от угла падения излучения на пилообразную микроструктуру с двумя внутренними рельефами. Показано, что минимизировать негативное влияние осцилляций на оценку предельно допустимого угла падения излучения и на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой, можно только путем увеличения отношения периода дифракционной микроструктуры к эффективной глубине рельефа.

*Ключевые слова:* Пилообразная рельефно-фазовая микроструктура, Дифракционная эффективность, RCWA-метод расчета дифракционной эффективности

*Цитирование:* Грейсух, Г. И. Дифракционная эффективность пилообразных двухрельфных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, Р. И. Куц // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 92–98.

## Введение

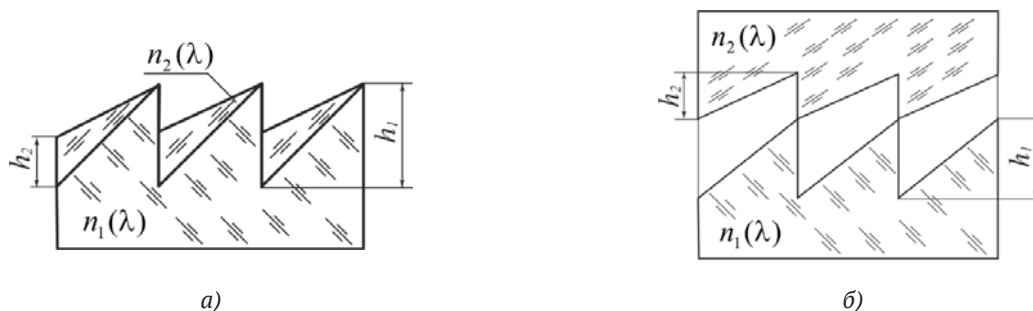
Одной из общих задач голографии и дифракционной оптики является достоверный расчет дифракционной эффективности (ДЭ) микроструктуры и анализ зависимости ДЭ от целого ряда конструктивных и технологических параметров. Наиболее просто и с наименьшими затратами машинного времени рассчитывать ДЭ позволяет скалярная теория дифракции (СТД). При решении ряда задач наблюдается хорошее совпадение результатов, даваемых СТД и электромагнитной теорией дифракции (ЭТД). Однако в случае рельефно-фазовых микроструктур с относительно низким (меньше двадцати) значением отношения периода дифракционной микроструктуры к высоте рельефа результаты, получаемые в рамках СТД, значительно отличаются от результатов, даваемые ЭТД [1-3]. В таких случаях достоверность результатов может быть гарантирована только путем решения системы уравнений Максвелла.

Существует несколько методов решения указанной системы, и одним из наиболее распространенных является строгий анализ связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis,

RCWA) [4-6]. Данный метод основан на решении уравнений Максвелла при определенных граничных условиях, и определение ДЭ какого-либо порядка сводится к решению системы граничных условий относительно амплитуды этого порядка.

### Результаты исследования

Практически безальтернативным RCWA-метод оказывается при расчете ДЭ двухрельфных пилообразных микроструктур (см. рис. 1), используемых в дифракционной оптике для подавления зависимости ДЭ микроструктуры, а следовательно, и дифракционного элемента от длины волны и угла падения излучения. При анализе в рамках ЭТД микроструктуры, компонуемые по схемам (а) и (б), представленные на рис. 1 и различающиеся эффективной глубиной рельефов ( $h_{eff}=h_1$  у микроструктур с внутренним и наружным рельефами и  $h_{eff}=h_1+h_2$  у микроструктур с двумя внутренними рельефами), дают разные значения ДЭ, особенно при наклонном падении излучения. Несовпадение кривых зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуры по схемам (а) и (б) наиболее ощутимо при значениях относительного пространственного периода микроструктуры  $P = \Lambda/h_{eff} < 20$  [7].



**Рис. 1** Двухслойные пилообразные дифракционные микроструктуры с одним (а) и двумя (б) внутренними рельефами

В этом случае кроме снижения ДЭ микроструктуры по схеме (б) из-за больших френелевских потерь наблюдается значительная осцилляция кривых зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру. Очевидно, что осцилляции, во-первых, препятствуют достоверной оценке предельно допустимого угла падения излучения на микроструктуру, а во-вторых, снижают качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой.

С целью выяснения причин осцилляций, уменьшения и даже исключения влияния френелевских потерь на ДЭ при расчете моделировались просветляющие покрытия на рабочих поверхностях микроструктуры, как это показано на рис. 2.

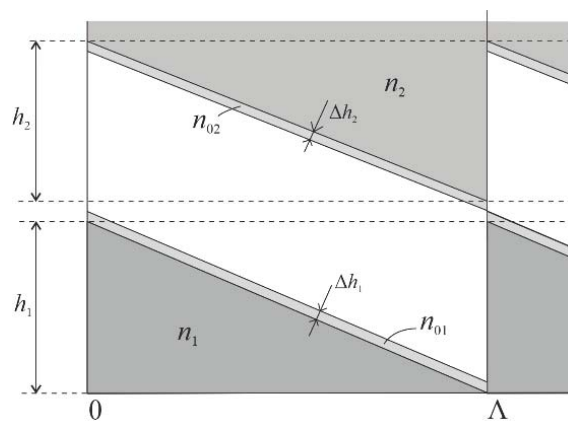


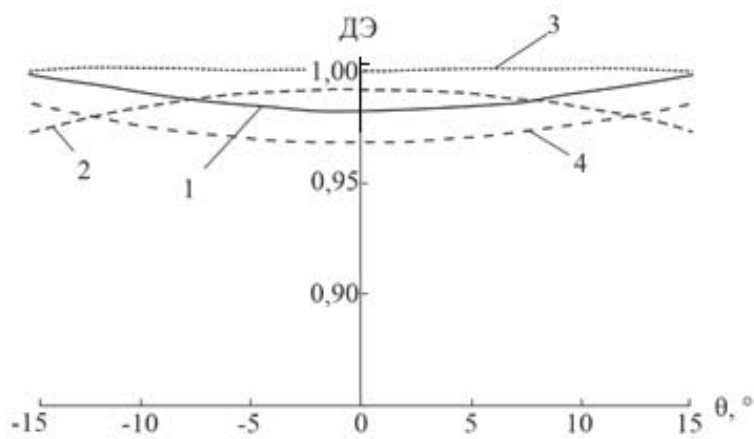
Рис. 2. Двухслойная двух-рельфная микроструктура с нанесенными на рельефы покрытиями

Пространство между рельефами в материалах микроструктуры с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  заполнено воздухом, а острые вершины рельефов соприкасаются покрытиями с толщинами  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  и показателями преломления  $n_{01}$  и  $n_{02}$  соответственно.

Расчеты выполнялись, в частности, для микроструктуры с нижним слоем из кроноподобного оптического пластика E48R ( $n_d = 1,531160$ ;  $v_d = 56,0438$ ), включенного в каталог ZEON программы оптического проектирования ZEMAX [8], и верхним слоем из флинтоподобного оптического пластика EP7000 ( $n_d = 1,651006$ ;  $v_d = 21,4946$ ), выпускаемого фирмой MITSUBISHI GAS CHEMICAL под торговой маркой Lupizeta™ EP7000 [9].

При расчетах RCWA-методом предполагалось, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления  $n_1$ , угол падения  $\theta$  отсчитывается от нормали к подложке, а дифрагированное излучение остается в среде с показателем преломления  $n_2$ . Глубины рельефов принимались равными  $h_1 = 8,792$  мкм,  $h_2 = 6,246$  мкм, что в скалярном приближении на длине волны  $\lambda = 0,6$  мкм обеспечивало ДЭ практически равную единице в интервале углов падения излучения  $\pm 15^\circ$  (см. рис. 3).

Для просветляющего покрытия использовался реальный материал  $\text{MgF}_2\text{-E}$  ( $n_d = 1,389557$ ;  $v_d = 104,8574$ ) или математическая модель материала, полностью исключая отражение при нормальном падении излучения любой длины волны в пределах рабочего спектрального диапазона ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм).



**Рис. 3.** Зависимости ДЭ исследуемой двухрельефной пилообразной микроструктуры от угла падения излучения  $\theta$  для ряда длин волн, полученные в рамках СТД: 1 —  $\lambda = 0,4$  мкм; 2 —  $\lambda = 0,5$  мкм; 3 —  $\lambda = 0,6$  мкм; 4 —  $\lambda = 0,7$  мкм

В случае реального материала толщины покрытий  $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,091635$  мкм, а показатели преломления  $n_{01} = n_{02}$ . Такое покрытие обеспечивало снижение коэффициента френелевского отражения пластика E48R при нормальном падении излучения из воздуха на длине волны  $\lambda = 0,51$  мкм до 1,3% и до 1,9% на краях рабочего спектрального диапазона, а пластика EP7000 — до 0,6% на длине волны  $\lambda = 0,51$  мкм и до 1,6% на краях рабочего спектрального диапазона.

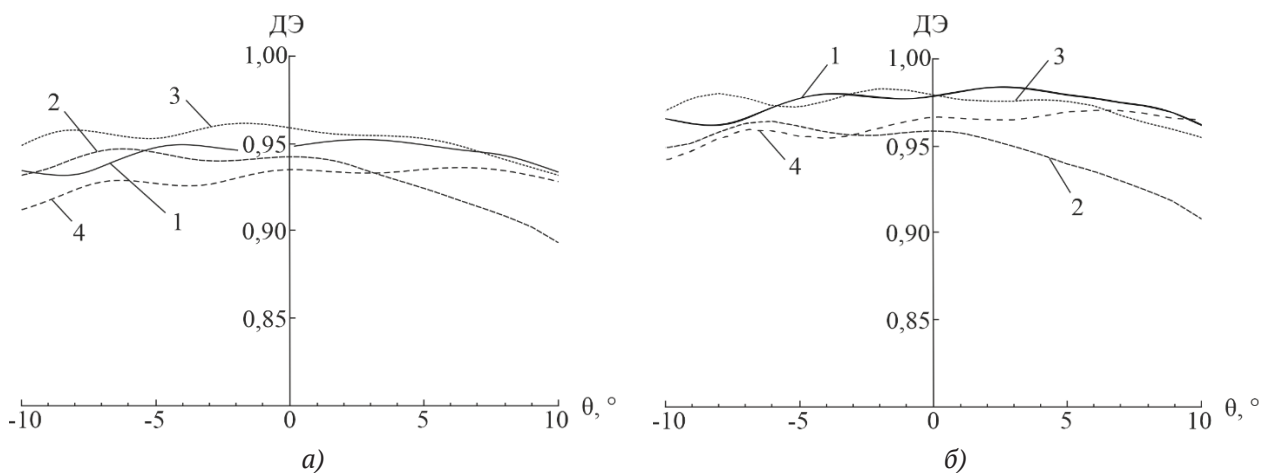
В случае математической модели материала покрытия его параметры для каждой длины волны вычислялись по формулам

$$n_{0i} = \sqrt{n_i},$$

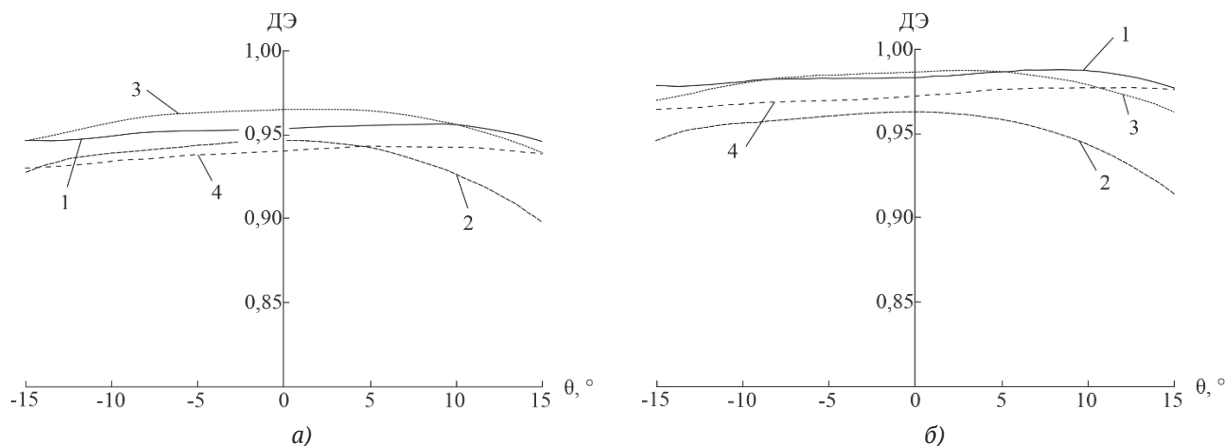
$$\Delta h_i = 0.25\lambda/n_{0i},$$

где  $i = 1, 2$ .

На рис. 4 и 5 представлены кривые зависимости ДЭ от угла падения излучения, полученные RCWA-методом с использованием разработанной авторами компьютерной программы «RCWA-PSUACE».



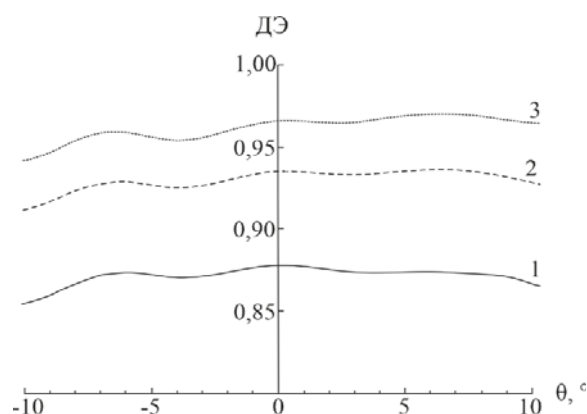
**Рис. 4.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения для ряда длин волн при  $P=10$ : а) – с просветляющими покрытиями из  $MgF_2-E$ , (б) – с модельными покрытиями, исключающими отражения; 1 –  $\lambda=0,4$  мкм; 2 –  $\lambda=0,5$  мкм; 3 –  $\lambda=0,6$  мкм; 4 –  $\lambda=0,7$  мкм



**Рис. 5.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения для ряда длин волн при  $P=30$ : (а) – с просветляющими покрытиями из  $MgF_2-E$ , (б) – с модельными покрытиями, исключающими отражения; 1 –  $\lambda=0,4$  мкм; 2 –  $\lambda=0,5$  мкм; 3 –  $\lambda=0,6$  мкм; 4 –  $\lambda=0,7$  мкм

Результаты расчетов, представленные на рис. 4 и 5, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Осциллирующий характер зависимостей ДЭ от угла падения излучения не связан с френелевским отражением излучения от плоских или рельефных рабочих поверхностей микроструктуры и при уменьшении или полном подавлении отражений эти зависимости сохраняют подобие. Еще более наглядно это подтверждается кривыми рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения на длине волны  $\lambda=0,7$  мкм при  $P=10$ : 1 – без просветляющих покрытий; 2 – с покрытиями из  $MgF_2-E$ ; 3 – с модельными покрытиями

- 2) Амплитуда осцилляций целиком определяется величиной относительного пространственного периода микроструктуры, в частности, в видимом спектральном диапазоне осцилляции значительны при  $P \leq 10$  и практически отсутствуют при  $P \geq 30$ .

- 3) В отсутствии френелевских потерь и при  $P \geq 30$  зависимости ДЭ от угла падения излучения, получаемые в рамках ЭТД, отличаются от соответствующих зависимостей, даваемых СТД, в основном незначительным снижением общего уровня и нарушением симметрии (сопоставьте рис. 5б и рис. 3).

### **Заключение**

При расчете ДЭ пилообразных рельефно-фазовых микроструктур в рамках ЭТД использование предложенной в докладе математической модели материала просветляющего покрытия плоских и рельефных рабочих поверхностей микроструктур позволяет полностью исключить отражения при нормальном падении излучения любой длины волны в пределах рабочего спектрального диапазона. Это дает возможность оценить предельно достижимую ДЭ исследуемой микроструктуры.

Осциллирующий характер зависимости ДЭ от угла падения излучения на пилообразную микроструктуру с двумя внутренними рельефами не связан с френелевским отражением излучения от плоских или рельефных рабочих поверхностей микроструктуры. Минимизировать негативное влияние осцилляций на оценку предельно допустимого угла падения излучения и на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой можно только путем увеличения отношения периода дифракционной микроструктуры к эффективной глубине рельефа.

### **Благодарность**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

### **Список источников**

- [1] Greisukh G. I. et al. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // *Optics Communications*. – 2015. – Т. 338. – С. 54-57.
- [2] Greisukh G. I. et al. Spectral and angular dependences of the efficiency of diffraction lenses with a dual-relief and two-layer microstructure // *Journal of Optical Technology*. – 2015. – Т. 82. – №. 5. – С. 308-311.
- [3] Greisukh G. I. et al. Spectral and angular dependences of the efficiency of relief-phase diffractive lenses with two-and three-layer microstructures // *Optics and Spectroscopy*. – 2015. – Т. 118. – №. 6. – С. 964-970.
- [4] Moharam M. G., Gaylord T. K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // *JOSA*. – 1981. – Т. 71. – №. 7. – С. 811-818.
- [5] Moharam M. G., Gaylord T. K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings // *JOSA*. – 1982. – Т. 72. – №. 10. – С. 1385-1392.
- [6] Moharam M. G. et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // *JOSA A*. – 1995. – Т. 12. – №. 5. – С. 1077-1086.
- [7] Greisukh G. I. et al. Limiting spectral and angular characteristics of sawtooth dual-relief two-layer diffraction microstructures // *Quantum Electronics*. – 2021. – Т. 51. – №. 2. – С. 184.
- [8] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>
- [9] MITSUBISHI GAS CHEMICAL [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta\\_ep.html](http://www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta_ep.html).

# Diffraction efficiency of sawtooth two relief microstructures in the framework of electromagnetic diffraction theory

*G. I. Greisukh, A. I. Antonov, E. G. Ezhov*

Penza State University of Architecture and Construction Penza, Russia

One of the common tasks of holography and diffractive optics is the reliable calculation of the diffraction efficiency (DE) of the microstructure. The most reliable estimate of the DE in the case of sawtooth relief-phase microstructures with a relatively low (less than twenty) value of the ratio of the period of the diffractive microstructure to the height of the relief can be obtained by a method based on the solution of the system of Maxwell equations and, in particular, a rigorous analysis of coupled waves (RCWA). The maximum achievable DE of a relief-phase microstructure by the RCWA method can be estimated using the mathematical model of the material of the antireflection coating of flat and relief working surfaces of the microstructure proposed in the report. The reason of the oscillating nature of the DE dependence on the angle of incidence of radiation on a sawtooth microstructure with two internal reliefs is established. It is shown that the negative effect of oscillations on the estimation of the maximum permissible angle of incidence of radiation and on the quality of the image formed by a refractive-diffractive optical system can be minimized only by increasing the ratio of the period of the diffractive microstructure to the effective depth of the relief.

*Keywords:* Sawtooth relief-phase microstructure, Diffraction efficiency, RCWA