

## Гармоническая дифракционная линза для RGB-светодиодного излучения

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

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Показано, что гармоническая пилообразная микроструктура позволяет дифракционной линзе работать с полихроматическим излучением, в частности с излучением RGB-светодиодов, но только с ограничениями, обусловленными продольным хроматизмом и специфической кривизной поля, которые в свою очередь зависят от дисперсионных свойств оптического материала линзы.

*Ключевые слова:* дифракционная линза, гармоническая пилообразная микроструктура, дифракционная эффективность, продольный хроматизм, кривизна поля.

*Цитирование:* Грейсух, Г. И. Гармоническая дифракционная линза для RGB светодиодного излучения / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, А. И. Антонов // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 196–200.

### Введение

Гармонической называют киноформную линзу, пилообразная микроструктура которой работает в высоких порядках дифракции и имеет глубину рельефа, существенно превышающую расчетную длину волны [1]. Апертура гармонической киноформной линзы разбита на так называемые гармонические зоны Френеля. Под этим термином понимается кольцевая зона апертуры, расстояния от краев которой до точки наблюдения (в данном случае фокальной точки  $F$ ) отличаются на величину, равную произведению порядка гармоничности  $m$  на расчетную длину волны  $\lambda_0$ , как это показано на рис. 1.

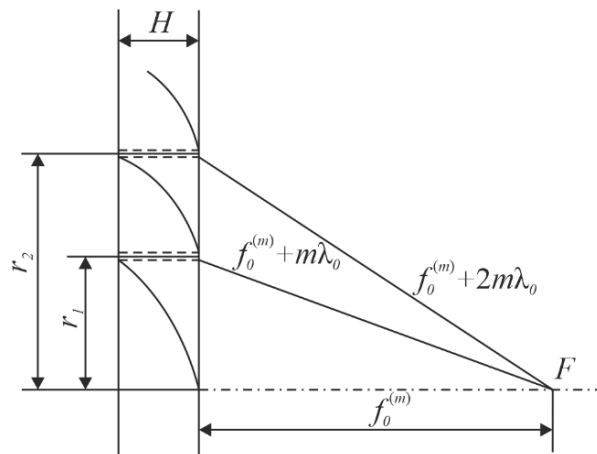
Глубина рельефа гармонической линзы

$$H = m\lambda_0 / (n_{\lambda_0} - 1), \quad (1)$$

где  $n_{\lambda_0}$  — показатель преломления материала подложки гармонической линзы на расчетной длине волны.

Как показано, например, в [2] дифракционная эффективность (ДЭ) гармонической линзы в  $k$ -м порядке дифракции и на длине волны  $\lambda$  равна

$$\eta = \left[ \frac{\sin \left( \pi \left[ k + \frac{m\lambda_0 \cos \Psi - \sqrt{n_{\lambda}^2 - \sin^2 \Psi}}{n_{\lambda_0} - 1} \right] \right)}{\pi \left( k + \frac{m\lambda_0 \cos \Psi - \sqrt{n_{\lambda}^2 - \sin^2 \Psi}}{n_{\lambda_0} - 1} \right)} \right]^2. \quad (2)$$



**Рис. 1.** Три приосевые зоны микроструктуры гармонической киноформной линзы

Здесь  $\Psi$  — угол падения излучения на гармоническую линзу, а  $n_\lambda$  — показатель преломления материала подложки гармонической линзы на длине волны  $\lambda$ . Из (2) легко получить, что длина волны  $\lambda_k$ , на которой при  $\Psi = 0$  будет выполняться условие  $\eta = 1$ , имеет вид

$$\lambda_k = \lambda_0 \frac{m n_\lambda - 1}{k n_{\lambda_0} - 1}. \quad (3)$$

Что же касается фокусного расстояния гармонической линзы в  $k$ -м порядке дифракции и на длине волны  $\lambda$ , то оно описывается выражением

$$f^{(k)}(\lambda) = \frac{m \lambda_0}{k \lambda} f_0^{(m)}, \quad (4)$$

где  $f_0^{(m)}$  — фокусное расстояние гармонической линзы в  $m$ -м дифракционном порядке на длине волны  $\lambda_0$ .

### Результаты исследования

Если гармоническая линза предназначена для работы в составе оптической системы, формирующей изображение объекта, освещаемого RGB-светодиодом, то ее ДЭ должна быть близка к единице по крайней мере на трех длинах волн, причем во всем диапазоне углов падения излучения на пилообразную микроструктуру. Здесь следует заметить, что с ростом угла падения плоской волны на микроструктуру увеличивается номер дифракционного порядка, обеспечивающего  $\eta = 1$  на конкретной длине волны. Это доказано в [2] как в рамках скалярной теории дифракции (СТД), так и в рамках электромагнитной теории (RCWA-методом). Рост же номера дифракционного порядка, как следует из (4) приводит к уменьшению фокусного расстояния на выбранной длине волны. Т. е. возникает специфическая, обусловленная гармонической микроструктурой абберация кривизны поля. Полностью исключить эту абберацию можно лишь не допустив перескока дифракционного порядка, а следовательно, ограничив угол  $\Psi$  и, соответственно, падение ДЭ в дифракционном порядке, найденном по формуле (3), уровнем близким к единице.

Соответствующие исследования были проведены в предположении, что в качестве источника излучения выбран светодиод 599R2GBC-CA [3]. Максимумы его RGB-излучения приходятся на длины волн  $\lambda_R = 0,625$  мкм,  $\lambda_G = 0,525$  мкм,  $\lambda_B = 0,460$  мкм. Полагалось, что в качестве материала гармонической линзы может быть использован кроно- или флинтоподобный оптический пластик, а падение ДЭ ограничивалось уровнями 0,95 и 0,8. В результате были получены предельные углы  $\Psi_{0,95}$  и  $\Psi_{0,8}$  для ряда гармонических линз выполненных из различных оптических пластмасс, представленных в соответствующих каталогах компьютерных программ оптического проектирования Zemax13 (каталоги ANGSTROMLINK, ZEON и MISC) [4] и Opticstudio (каталог APEL) [5], а также пластиков, выпускаемых фирмой MITSUBISHI GAS CHEMICAL под торговой маркой Lupizeta [6]. При этом оказалось, что обеспечить  $\eta \approx 1$  одновременно на трех длинах волн ( $\lambda_R$ ,  $\lambda_G$  и  $\lambda_B$ ) для каждого оптического материала позволяют несколько значений порядка гармоничности  $m$ . Но предельные углы для любого материала линзы тем больше, чем ниже порядок гармоничности. Так, например, у гармонических линз, выполненных из группы кроно- и флинтоподобных пластиков, включающей ACRYLIC, E48R, APL5514ML, POLYCARB и EP4550 при  $m = 6$ ,  $k_R = 5$  и  $k_B = 7$  наименьшие углы падения излучения, при которых  $\eta = 0,95$ , лежат в интервале  $14,4^\circ - 14,85^\circ$ , а наименьшие углы падения излучения, при которых  $\eta = 0,8$ , лежат в интервале  $19,35^\circ - 20,7^\circ$ . В то же время у гармонической линзы, выполненной из флинтоподобного пластика EP9000 при  $m = 11$ ,  $k_R = 9$  и  $k_B = 13$  наименьший угол падения излучения, при котором  $\eta = 0,95$ , равен  $11,25^\circ$ , а наименьший угол падения излучения, при котором  $\eta = 0,8$ , равен  $15,975^\circ$ .

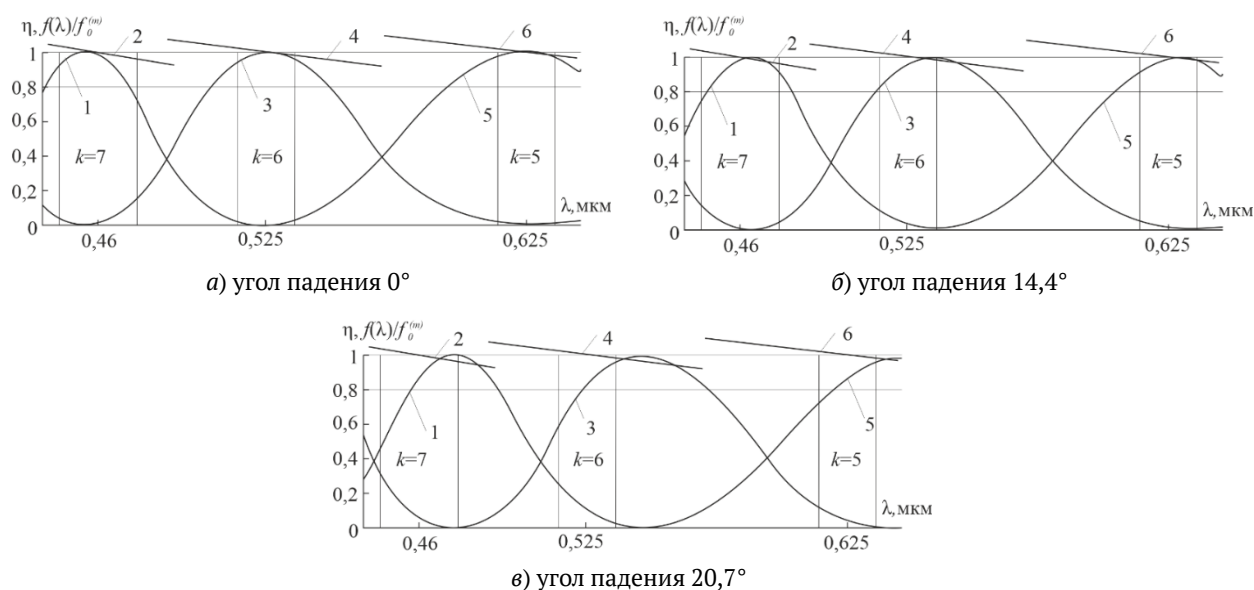
Что же касается фокусного расстояния гармонических линз, то оно как и у любой дифракционной линзы обратно пропорционально длине волны  $\lambda$ . При этом разница фокусных расстояний, а следовательно, и оптических сил фокусирующего элемента на центральной и крайних длинах волн рабочего спектрального диапазона, представляющая собой продольный хроматизм, обычно характеризуется коэффициентом дисперсии. В нашем случае этот коэффициент имеет вид

$$v = \frac{\Phi_0}{\Phi_{\lambda_{\min}} - \Phi_{\lambda_{\max}}} = \frac{\Phi_G}{\Phi_B - \Phi_R} = \frac{k_G \lambda_G}{k_B \lambda_B - k_R \lambda_R}, \quad (5)$$

где  $\Phi_i = 1/f_i$  — оптическая сила гармонической линзы на длине волны  $\lambda_i$ , а  $k_i$  — порядок дифракции, в котором на длине волны  $\lambda_i$  обеспечивается  $\eta \approx 1$ .

Для гармонических линз, рассчитанных на излучение выбранного RGB- светодиода и выполненных из кроно- и флинтоподобных пластиков вышеприведенной группы формула (5) дает  $v = 33,16$  и фокусное расстояние на длине волны  $\lambda_B$  равно  $0,978 f_0^{(m)}$ , а на длине волны  $\lambda_R$  —  $1,008 f_0^{(m)}$ . Здесь  $f_0^{(m)}$  — фокусное расстояние гармонической линзы в  $m$ -ом дифракционном порядке на длине волны  $\lambda_0 = \lambda_G$ .

Вышеизложенное наглядно демонстрируют рис. 2а–2в, на которых приведены графики зависимости ДЭ и фокусного расстояния гармонической линзы, выполненной из пластика



1, 3, 5 — кривые зависимости ДЭ; 2, 4, 6 — кривые зависимости фокусного расстояния

**Рис. 2.** Кривые зависимости ДЭ и фокусного расстояния гармонической линзы от длины волны в трех дифракционных порядках при различных углах падения излучения на микроструктуру

E48R, от длины волны в трех дифракционных порядках: *a* — при нормальном падении излучения, *б* — при угле падения, соответствующем  $\eta = 0,95$ , и *в* — при угле падения, соответствующем  $\eta = 0,8$ . Вертикальные прямые на этих рисунках ограничивают по уровню половинной мощности спектральные RGB-полосы излучения светодиода 599R2GBC-CA:  $0,625 \pm 0,01$  мкм;  $0,525 \pm 0,011$  мкм;  $0,460 \pm 0,015$  мкм.

Что касается гармонической линзы, выполненной из пластика EP9000, то у нее  $\nu = 16,27$ . При этом фокусное расстояние на длине волны  $\lambda_B$  равно  $0,9657f_0^{(m)}$ , а на длине волны  $\lambda_R$  —  $1,027f_0^{(m)}$ .

### Заключение

Представленные в докладе результаты наглядно демонстрируют, что гармоническая пилообразная микроструктура позволяет дифракционной линзе работать с полихроматическим излучением, в частности с излучением RGB-светодиодов, но только с ограничениями, обусловленными продольным хроматизмом и специфической кривизной поля.

Величина хроматизма зависит от соотношения дифракционных порядков единичной эффективности. Причиной же специфической кривизны поля является перескок рабочего порядка дифракции с увеличением угла падения волн на микроструктуру. Причем допустимые углы падения для любого материала гармонической линзы тем больше, чем ниже порядок гармоничности.

### Благодарность

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

**Список источников**

- [1] **Sweeney, D. W.** [Harmonic diffractive lenses](#) / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2474.
- [2] **Грейсух, Г. И.** Гармоническая киноформная линза: дифракционная эффективность и хроматизм / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, С. А. Степанов, А. И. Антонов, Б. А. Усиевич // Оптика спектроскопия. — 2018. — Том 125. — № 2. — С. 223–228.
- [3] **Сыромясов, Д. О.** Исследование спектров излучения RGB-светодиода для построения модели цветового зрения / Д. О. Сыромясов // Научное обозрение. — 2017. — № 2. — С. ID44