

Р. В. Трембовецкая, к.т.н., доцент
Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина
rustsur@rambler.ru

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАДИЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В роботі розглянуто можливість використовувати для віртуального моделювання градієнтних елементів програму TracePro. Встановлено основні оптичні параметри, які впливають на хід променів у градієнтному елементі. Розглянуто різноманітні залежності, які описують розподіл показника заломлення, а саме: аксіально-радіальний, аксіально-еліптично-радіальний, аксіально-синусоїдально-радіальний, розподіл SELFOC, розподіл Wood Lens, сферичний. Отримано оптичні параметри градієнтних елементів, а саме коефіцієнт розподілу показника заломлення залежно від довжини хвилі для типів SLC-180, SLH-180, SLW-100. Показано, як задаються та варіюються оптичні параметри, що дозволить проектувати градієнтні елементи, використовуючи каталог готових матеріалів, та виконувати дослідження нових матеріалів. Для комп'ютерного віртуального моделювання координати променя використовувався серійний градан типу SLC-180.

Ключові слова: градієнтні елементи; радіальний розподіл показника заломлення; коефіцієнт розподілу показника заломлення; відхилення координати променя; дисперсійна формула.

Введение. Градиентные элементы с радиальным распределением показателя преломления длиной $\pi/2g$ с диаметром 0,5-2,0 мм стали неотъемлемой частью большинства устройств волоконной оптики. Они используются для соединения отдельных волокон, источника и приемника излучения с волокном, в оптических переключателях и т.д. [1-4].

Все более широко используются градиентные элементы в технических и медицинских эндоскопических системах, что позволяет контролировать труднодоступные места в машинах и приборах без демонтажа конструкций и с минимальным нарушением физической целостности. Во многих областях медицины (бронхоскопия операционная, цистоскопия, лапароскопия, гистероскопия, артроскопия) от эндоскопа требуется минимальный размер и максимально высокое качество изображения, особенно когда для проведения исследований необходимо нарушать целостность биологических тканей [4].

Отсутствие мозаичной структуры при высоком качестве изображения обеспечивают жесткие эндоскопы, построенные на базе линзовых элементов. Но такие эндоскопы имеют до нескольких десятков линз малого диаметра и достаточно дороги. Десятки обычных линз в эндоскопе могут заменить градиентные эле-

менты с радиальным распределением показателя преломления [1, 4].

Важным направлением современной оптики является применение градиентных элементов для устранения сферической и других видов аберраций в сложных многолинзовых системах [3].

Как было показано в [4, 5], для уменьшения аберрации можно использовать вместо обычных линз так называемые градиентные, в которых фокусное расстояние уменьшается за счет использования материалов с медленно изменяющимся показателем преломления.

Использование градиентных элементов позволяет улучшить качество изображения и уменьшить диаметр рабочей части жесткого эндоскопа до 1,9 мм (при диаметре градиентных стержней 1 мм), а в офтальмологических эндоскопах диаметр рабочей части может быть еще меньше.

Цель работы: описать оптические параметры градиентных элементов и показать их влияние на координаты луча в выходной плоскости градиентной линзы.

Постановка задачи. В наибольшем объеме выпускаются элементы с радиальным распределением показателя преломления, в которых показатель преломления монотонно убывает от оси к периферии.

Градиентные линзы имеют в параксиальной области показатель преломления, изменяющийся по параболическому закону, вне параксиальной области – полиномиальный. Полиномиальное распределение показателя преломления позволяет получить градан с лучшим качеством изображения.

При радиальном распределении показателя преломления точное фокусирование всех меридиональных лучей обеспечивает распределение показателя преломления следующего вида [4]:

$$n^2(r) = n_0^2 \cdot \left[1 - (g \cdot r)^2 + \frac{2}{3} \cdot (g \cdot r)^4 - \frac{17}{45} \cdot (g \cdot r)^6 \right],$$

n_0 – показатель преломления материала градана вдоль его оптической оси;

g – коэффициент распределения показателя преломления, определяющий фокусирующее свойства градана, мм⁻¹;

r – текущее значение радиуса градана, мм.

Кроме радиального распределения, можно использовать [6]:

- аксиально-радиальное

$$n(r, z) = n_0 + nz_1 \cdot z + nz_2 \cdot z^2 + nz_3 \cdot z^3 + nz_4 \cdot z^4 + nr_1 \cdot r^2 + nr_2 \cdot r^4 + nr_3 \cdot r^6 + nr_4 \cdot r^8; r^2 = x^2 + y^2; \quad (1)$$

- аксиально-эллиптически-радиальное (формула (1)) с $r^2 = nr_x \cdot x^2 + nr_y \cdot y^2$;

- аксиально-синусоидально-радиальное (формула (1)) с

$$r^2 = 1 + sv_a \cdot \sin\left(\frac{z}{sv_p} + sv_f\right) \cdot (x^2 + y^2);$$

- распределение SELFOC

$$n^2(r) = n_0^2 \cdot [1 - (nr_1 \cdot r)^2 + nr_2 \cdot (nr_1 \cdot r) + nr_3 \cdot (nr_1 \cdot r)^6 + nr_4 \cdot (nr_1 \cdot r)^8]; \quad (2)$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

- распределение Wood Lens;

- сферическое

$$n(r) = n_0 - nr_1 \cdot (sg_c - r) + nr_2 \cdot (sg_c - r)^2 + nr_3 \cdot (sg_c - r)^3 + nr_4 \cdot (sg_c - r)^4; \quad (3)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + (z - sg_c)^2$$

В программе виртуального моделирования необходимо задать закон распределения Gradient Index Type: Axiale-Radial, Axiale-Elliptical-Radial, Axiale-Sinusoidal-Radial, Sel-foc, Wood Lens, Maxwells Fisheye Lens,

Lunedurg Lens. И, как видно из формул (1-3), основным параметром, который будет влиять на ход лучей в оптическом элементе, является коэффициент распределения показателя преломления. Для точного моделирования необходимо задавать это параметр для каждой длины волны источника излучения, т.е. необходимо знать зависимость $g(\lambda)$. Определим эту зависимость для наиболее распространенных материалов, которые используются для градиентных элементов (типов SLC, SLH, SLW) [6, 7].

Используя ограниченные экспериментальные данные [6, 7], автором уточнен коэффициент распределения показателя преломления с помощью функции $genfit(VX, VY, VS, F)$ для длины волны $\lambda=(550-2000)$ нм. Эта функция возвращает вектор K параметров функции F , дающий минимальную среднеквадратичную погрешность приближения функцией $P(x, K_1, K_2, \dots, K_n)$ исходных данных [6].

При этом функция F должна быть вектором с символьными элементами, содержащими уравнение исходной функции и ее производных по всем параметрам [6]. Поэтому предварительно вычисляем производные по всем параметрам, а также задаем начальные значения элементов вектора K , необходимые для решения системы нелинейных уравнений регрессии итерационным методом [6]. Выполнив все предварительные расчеты, необходимые для вычисления функции $genfit()$, получаем вектор K параметров функции F . При расчете вектора K в качестве функции F используем уравнение: $F(\lambda, a, b, c, d) = (a \cdot \lambda + b \cdot \lambda^2 + c \cdot \lambda^3 + d) \cdot \lambda^{-1}$.

В результате имеем коэффициент распределения показателя преломления в виде: $g(\lambda) = a + b \cdot \lambda + c \cdot \lambda^2 + d \cdot \lambda^{-1}$.

Ко-эфф.	Материал		
	SLC-180	SLH-180	SLW-100
a	0.3001145	0.3511101	0.550458
b	9.29651 10 ⁻³	0.0424366	0.0265157
c	-1.43251 10 ⁻³	-9.5007710 ⁻³	-5.4579110 ⁻³
d	0.018434	0.0357453	0.0275776

На рис. 1 показаны зависимости коэффициента преломления от длины волны, полученные в результате расчета.

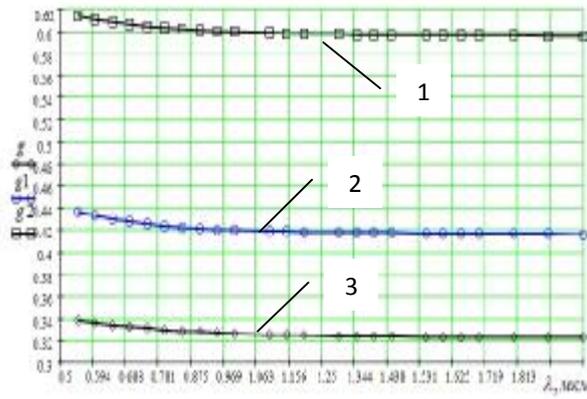


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения показателя преломления от длины волны для различных типов градиентных линз: 1 – SLC-180; 2 – SLH-180; 3 – SLW100

При моделировании этот коэффициент рассчитываем и записываем для каждой длины волны источника излучения (0,55-2,0 мкм) (рис. 2).

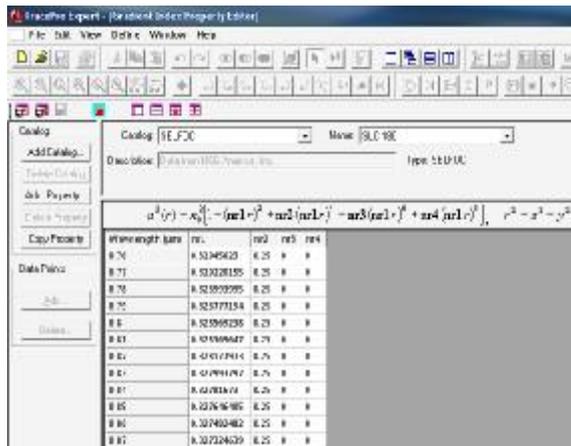


Рис. 2. Пример задания коэффициентов распределения показателя преломления в программе TrasePro

Для виртуального моделирования в программе TrasePro [3] необходимо задать материал линзы Material Interpolations и дисперсионную формулу, которая может быть:

- Schott

$$n^2(\lambda) = a_1 + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^{-2} + a_4 \cdot \lambda^{-4} + a_5 \cdot \lambda^{-6} \quad (4)$$

- Sellmeier

$$n^2(\lambda) - 1 = a_1 \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda^2 - a_4)^{-1} + a_2 \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda^2 - a_5)^{-1} + a_3 \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda^2 - a_6)^{-1} \quad (5)$$

- Extended Schott

$$n^2(\lambda) = a_1 \cdot \lambda^2 + a_2 \cdot \lambda^6 + a_3 \cdot \lambda^4 + a_5 + a_6 \cdot \lambda^{-2} + a_7 \cdot \lambda^{-4} + a_8 \cdot \lambda^{-6} \quad (6)$$

- Herzberger

$$n(\lambda) = a_1 + a_2 \cdot L + a_3 \cdot L^2 + a_4 \cdot \lambda^2 + a_5 \cdot \lambda^4 + a_6 \cdot \lambda^6, \quad L = \frac{1}{\lambda^2 - 0.028} \quad (7)$$

- Conrady

$$n(\lambda) = a_1 + a_2 \cdot \lambda^{-1} + a_3 \cdot \lambda^{-3.5} \quad (8)$$

Результат расчета зависимости (4) для наиболее распространенных материалов, которые используются для градиентных элементов [6], показано на рис. 3.

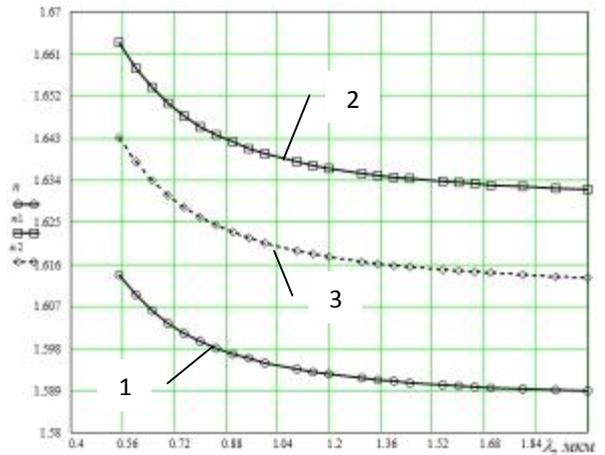


Рис. 3. Зависимость показателя преломления от длины волны для различных типов градиентных линз: 1 – SLC-180, SLW100, SLW180, SLW200; 2 – SLH180; 3 – SLW300, SLW400

Имея основные оптические параметры градиентного элемента $g(\lambda)$ и $n(\lambda)$, можно выполнять моделирование.

Для виртуального моделирования координаты луча использовался градиентный элемент типа SLC-180 с $g_0 = 0.338 \text{ мм}^{-1}$, $n_0 = 1.61409$ при длине волны $\lambda = 0,5461 \text{ мкм}$ и угле вхождения лучей $\theta = 0$.

Чтобы оценить ход луча в градиентном элементе, используем, например, три источника излучения со следующими длинами волны: 0,55 мкм, 1,0 мкм, 1,55 мкм. При этом необходимо задать расположение лучей в профиле, которое может быть: Circular, Rectangular, Dithered ract, Cross, Random, Checkerboard. Чтобы лучи от всех источников не слились воедино, располагаем их радиусы вхождения в элемент соответственно 0,5 мм, 0,75 мм, 0,9 мм.

При этом необходимо учитывать, что в среде с радиальным распределением показателя преломления...

теля преломлення траектории луча не всегда являются плоской кривой. Если касательная к траектории луча и ось симметрии распределения показателя преломления не лежат в одной плоскости, то траектория луча представляет собой пространственную кривую [3]

На рис. 4 показан результат виртуального моделирования луча при различных длинах волн источника излучения.

При расположении градиентного элемента не произвольно, как показано на рис. 4, а в плоскости X-Z, можно увидеть, что внутри лучи с различными длинами волн имеют свою точку пересечения с оптической осью, что вполне объяснимо, поскольку оптические параметры зависят от длины волны. При этом в выходной плоскости градиентной линзы

имеется погрешность положения координаты луча. Оценить ее с помощью программы виртуального моделирования невозможно. Это можно сделать более мощным математическим аппаратом, например MathCAD.

Таким образом для виртуального моделирования градиентных элементов можно предложить использовать программу TracePro, где имеется широкий выбор функций интерполяции дисперсионных формул и формул для описания Gradient Index.

В программе TracePro достаточно легко можно задавать и варьировать оптические параметры, что позволит как проектировать градиентные элементы, используя каталог готовых материалов, так и создавать (исследовать) новые материалы.

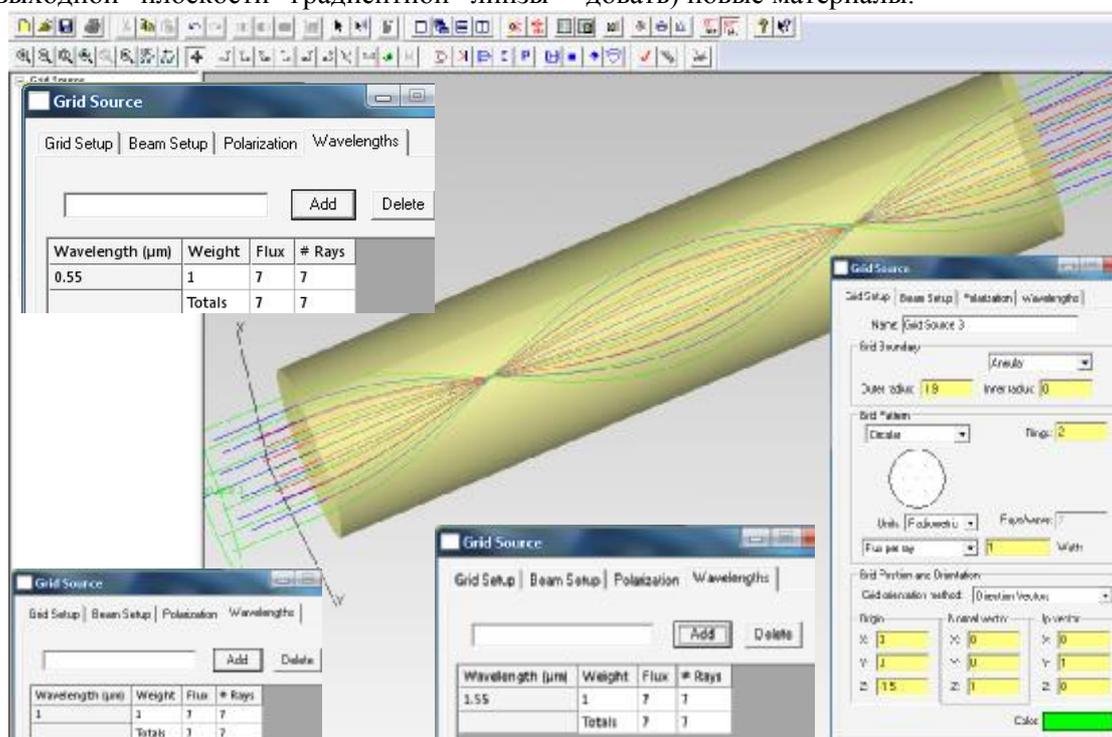


Рис. 4. Результат виртуального моделирования луча для градиентного элемента типа SLC-180 $g_0 = 0.3 \text{ мм}^{-1}$, $n_0 = 1.61409$ при различных длинах волн источника излучения и угле вхождения лучей $\theta=0$

Выводы:

1. Описаны оптические параметры градиентных элементов, а именно коэффициент распределения показателя преломления для типов SLC-180, SLH-180, SLW-100.

2. Рассчитаны зависимости показателя преломления от длины волны для следующих типов градиентных линз: SLC-180, SLW100, SLW180, SLW200, SLH180; SLW300, SLW400.

3. В результате виртуального моделирования установлено, что внутри градиентно-

го элемента лучи с различными длинами волн имеют различные точки пересечения с оптической осью, что вполне объяснимо, поскольку оптические параметры зависят от длины волны. При этом в выходной плоскости градиентной линзы имеется погрешность положения координаты луча.

В дальнейшем представляет интерес получить численные значения погрешности координаты луча в выходной плоскости. Это позволит оценить влияние оптических параметров на погрешность.

Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики / [под ред. Т. Окози] : пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
2. Хацевич Т. Н. Эндоскопы : учеб. пособ. / Т. Н. Хацевич, И. О. Михайлов. – Новосибирск : СГТА, 2002. – 196 с.
3. Шредер Г. Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайбер. – М. : Техносфера, 2006. – 424 с.
4. Васильев Ю. Использование градиентных микролинз для соединения оптических элементов / Ю. Васильев // Компоненты и технологии. – 2007. – № 10.
5. Трёмбоветская Р. В. Выбор оптической системы для медицинских эндоскопов / Р. В. Трёмбоветская // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 4.
6. <http://www.sales@lambdares.com>
7. Selfoc Product Guide. NSC Europe (1997). Belgium, 40 p.
8. Дьяконов В. П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. Универсальная система математических расчетов / В. П. Дьяконов. – М., 1998.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2014.

R. V. Trembovetskaya, Ph.D.

Cherkasy State Technological University
Shevchenko Blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
rustsur@rambler.ru

References

1. Fiber optic sensors (1990) . In: T. Okosi: (Ed.). Leningrad, Energoatomizdat. Lening. otd-nie, 256 p. [in Russian].
2. Hatsevich, T. N. and Mikhailov, I. O. (2002) Endoscopes. Novosibirsk: SHTA, 196 p. [in Russian].
3. Schroeder, G. and Trayber, H. (2006) Technical optics. Moscow: Technosfera, 424 p. [in Russian].
4. Vasilyev, Yu. (2007) The use of gradient microlenses for connection of optical elements. *Komponenty i tehnologii*, (10) [in Russian].
5. Trembovetskaya, R. V. (2013) The choice of optical system for medical endoscopes. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (4) [in Russian].
6. <<http://www.sales@lambdares.com>>
7. Selfoc Product Guide. NSC Europe (1997). Belgium, 40 p.
8. Dyakonov, V. P. (1998) Reference MathCAD PLUS 7.0 PRO. Universal system of mathematical calculations. Moscow [in Russian].

VIRTUAL SIMULATION OF OPTICAL PARAMETERS FOR GRADIENT ELEMENTS

In technical and medical endoscopic systems (operating bronchoscopy, cystoscopy, laparoscopy, hysteroscopy, arthroscopy) gradient elements are widely used that allow you to control remote places in machines and devices without dismantling the structures and with minimal disruption to physical integrity. The use of gradient elements to eliminate spherical and other aberrations in complex multi-part systems is an important direction of modern optics.

The description of optical parameters of gradient elements and showing their impact on the coordinates of the beam in output plane gradient lenses is the objective of the work. In this paper with the help of virtual simulation program TracePro you can specify the distribution law of gradient index type: axial-radial, axial-elliptical-radial, axial-sinusoidal-radial, Selfoc, Wood lens, Maxwells Fish-eye lens, Lunedurg lens. The main parameter which influences the path of optical element has a refractive index distribution coefficient. For accurate simulation it is necessary to know the relationship $g(\lambda)$. In this paper the dependence of the most common materials is used for gradient elements (of SLC, SLH, SLW types). For this function $genfit(VX, VY, VS, F)$ is used for the wavelength $\lambda=(550-2000)$ nm. The simulation at the location of gradient element on XZ plane shows that the rays of different wavelengths have the point of intersection with optical axis, which is understandable, since optical parameters depend on the wavelength. In the exit plane of gradient lens accurate position coordinates of the beam are attached. To evaluate it using virtual simulation is impossible. Gradient parameters describe optical elements, namely a ratio of refractive index distribution. The dependences of refractive index of the wavelength are shown.

Key words: gradient elements, refractive index radial distribution, refractive index distribution coefficient, beam coordinates deflection, dispersive formula.