

УДК 535.4

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

В.Н. Васильев, Д.Н. Воронцов, А.И. Драгунов, И.Л. Лившиц, Е.А. Соколова

Исследуются особенности автоматизированного проектирования различных типов дифракционных решеток с использованием программы ZEMAX. Показано, что выбор моделей задания дифракционных решеток в большинстве случаев определяется технологией их изготовления. Представлены рекомендации по заданию пяти типов решеток – эллиптической решетки первого и второго типа, голограммы, бинарной поверхности первого типа и оптически сформированной голограммы. Показана связь способа моделирования дифракционных решеток с технологией их изготовления. Даны рекомендации по выбору оптимальной модели для нарезных и голограммных дифракционных решеток.

Ключевые слова: дифракционная решетка, спектрометр, голограмма, фазовые коэффициенты.

Введение

Дифракционные оптические элементы находят все более широкое применение в различных оптических системах, однако процесс их практического проектирования вызывает сложности в большинстве разработок, что связано в основном с ограниченным количеством публикаций по этой актуальной тематике.

Программы автоматического расчета оптических систем существенно экономят время разработчика. Исторически такие программы создавались в первую очередь для проектирования линзовых объективов и уже позже в них добавлялись возможности моделирования других оптических систем, например, таких как спектрометры с дифракционными решетками. Тип оптической поверхности под названием «Дифракционная решетка» присутствует в программе ZEMAX. Однако этот тип поверхности позволяет моделировать только дифракционную решетку с прямыми и равноотстоящими штрихами, что уже недостаточно при современном развитии технологии изготовления дифракционных решеток, а также теории aberrаций дифракционных решеток, имеющих неплоскую поверхность, сложную форму штрихов и неравномерное распределение штрихов по поверхности решетки. Программа содержит также еще ряд оптических поверхностей, которые могут быть использованы для моделирования различных дифракционных решеток. Однако в описании программы [1] отсутствует информация о том, что эти типы поверхностей могут быть использованы для моделирования дифракционных решеток. Вопрос о моделировании различных типов дифракционных решеток не рассматривается в учебных курсах, читаемых разработчиками программы для пользователей. Более того, инструкторы, читающие эти курсы, чаще всего затрудняются ответить на вопросы, связанные с моделированием сложных типов решеток, поскольку не достаточно знакомы с технологией их изготовления.

В настоящей работе на простом примере моделирования и оптимизации спектрометра с вогнутой сферической дифракционной решеткой и плоским приемником последовательно показано, какие поверхности могут быть использованы для такого моделирования, какой уровень компенсации aberrаций может быть достигнут при использовании различных моделей, как параметры оптимизации связаны с технологическими параметрами изготовления дифракционных решеток. Целью работы является объединение достижений в автоматическом проектировании, теории aberrаций и технологии изготовления дифракционных решеток в одну систему, что должно позволить более широкому кругу расчетчиков оптических систем успешно проектировать спектрометры.

Поверхность «Дифракционная решетка»

Такая решетка имеет постоянный шаг и прямолинейные штрихи. При фиксированном радиусе кривизны параметры для оптимизации самой решетки отсутствуют.

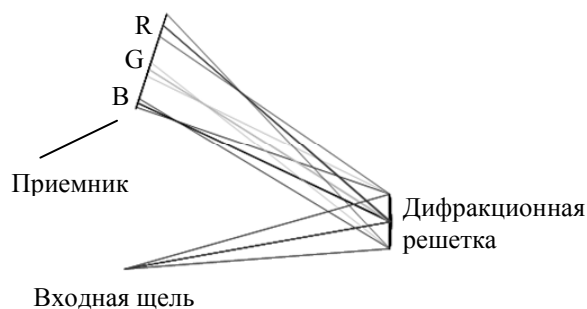


Рис. 1. Ход лучей в спектрометре с решеткой, имеющей прямые равноотстоящие штрихи

Можно оптимизировать только параметры схемы спектрометра. У такой решетки фокальные кривые в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях не совпадают: в меридиональной плоскости – это круг Роуланда, в сагиттальной – прямая Сиркса, т.е. касательная к кругу Роуланда, перпендикулярная нормали решетки. Спектральные изображения точки на входной щели являются астигматическими и расфокусированными. Ход лучей в спектрометре с такой решеткой показан на рис. 1.

Эллиптическая решетка первого типа

Такая поверхность в общем случае может иметь эллипсоидальную форму. Однако для большинства спектрометров целесообразно использовать сферическую поверхность как частный случай эллипсоида. В отличие от предыдущего типа поверхности, эллиптическая решетка первого типа позволяет вводить и оптимизировать коэффициенты неравномерности шага α и β , которые являются параметрами оптимизации и могут быть технологически реализованы при изготовлении решетки на делительной машине. Шаг эллиптической решетки изменяется по закону

$$d = d_0 + \alpha y + \beta y^2,$$

где d_0 – расстояние между штрихами в центре решетки; d – расстояние между штрихами в точке на поверхности решетки с координатой y .

Шаг решетки с переменным шагом, задаваемым коэффициентами μ и ν , изготовленной на делительной машине, изменяется по закону

$$d = d_0(1 + \mu y + \nu y^2).$$

Таким образом, оптимизированные при помощи программы ZEMAX коэффициенты неравномерности шага решетки перед изготовлением должны быть пересчитаны по формулам

$$\mu(\text{мм}^{-1}) = \frac{\alpha}{d_0}(\text{мкм}),$$

$$\nu(\text{мм}^{-1}) = \frac{\beta}{d_0}(\text{мкм}).$$

Эллиптическая решетка второго типа

Эллиптическая решетка второго типа имеет равноотстоящие, но криволинейные штрихи. Дополнительным параметром оптимизации в этом случае является кривизна штриха, задаваемая параметром θ , который также является тангенсом угла наклона оси качания резца делительной машины при изготовлении дифракционной решетки. Пересчет параметров перед изготовлением в данном случае не требуется. Однако при оптимизации надо иметь в виду, что большинство конструкций делительных машин не позволяет наклонять ось качания резца на угол, превышающий 30° . На делительной машине также могут быть изготовлены дифракционные решетки, имеющие и переменный шаг, и криволинейные штрихи. Однако программа ZEMAX не имеет поверхности, при помощи которой можно непосредственно моделировать такие решетки. Для моделирования таких решеток может быть использована бинарная поверхность первого типа, свойства которой рассмотрены ниже.

Голограмма

Поверхность, обозначенная в программе ZEMAX как голограмма, подходит для моделирования голограммной решетки, записанной при помощи двух точечных источников (точечных диафрагм, в которые сфокусированы записывающие пучки). Дополнительными параметрами оптимизации в данном случае являются координаты точечных источников, используемых для записи решетки. В качестве исходных параметров можно выбрать источники, расположенные симметрично на круге Роуланда. Например, для записи решетки, имеющей 1200 штрихов на миллиметр (расстояние между штрихами в центре решетки равно 833,333 нм) на сферической поверхности с радиусом кривизны R , равным 100 мм, при помощи лазера с длиной волны 457 нм, углы падения излучения двух записывающих пучков на сферическую поверхность, γ и $-\gamma$, могут быть рассчитаны по формуле

$$\gamma = \arcsin\left[\frac{1}{d}\right] = \arcsin\left[\frac{457}{833,333}\right] = 15,9144^\circ.$$

Исходные координаты точечных источников $Y1$, $Z1$, $Y2$ и $Z2$ в этом случае рассчитываются по формулам

$$Y1 = R \sin \gamma \cos \gamma = 26,3691 \quad Z1 = -R \cos 2\gamma = -92,4814,$$

$$Y2 = -R \sin \gamma \cos \gamma = -26,3691 \quad Z2 = -R \cos 2\gamma = -92,4814.$$

При оптимизации необходимо контролировать сохранение заданного числа штрихов на миллиметр (постоянной решетки), а также реализуемость схемы записи – ограничение углов падения излучения на сферическую поверхность.

Оптически сформированная голограмма

Поверхность, названная в программе ZEMAX оптически сформированной голограммой, может быть использована для моделирования голограммной решетки, записанной в более сложной оптической схеме, когда после точечных диафрагм на пути записывающих пучков используются дополнительные оптические элементы, например, линзы или сферические зеркала. Параметры этих элементов являются дополнительными параметрами оптимизации. В случае, когда оптимизация схемы записи при помощи двух точечных источников не дает желаемого результата, в нее вводят дополнительные оптические элементы. При этом каждый записывающий пучок моделируется в отдельном файле, и при оптимизации изменяются параметры как основного файла, в котором смоделирована оптическая схема спектрометра, так и двух вспомогательных файлов, соответствующих двум записывающим пучкам со всеми оптическими элементами, формирующими падающие на заготовку решетки волновые фронты. Перед введением в схему записи дополнительных оптических элементов координаты точечных источников можно пересчитать в параметры, используемые во вспомогательных файлах, по следующим формулам:

$$\text{Thickness} = (Y^2 + Z^2)^{1/2},$$

$$\text{TiltaboutX} = \arctg Y/Z.$$

Бинарная поверхность первого типа

Дифракционная решетка с любой формой штрихов и любым их расположением может быть описана полиномиальным уравнением, которое связывает координаты точки на его поверхности с номером штриха и набором коэффициентов. Ограничивая число членов разложения определенными степенями координат, мы ограничиваем число рассматриваемых аберраций. В программе ZEMAX такая решетка моделируется как бинарный элемент, заданный набором фазовых коэффициентов, однозначно связанных с коэффициентами разложения в степенной ряд функции оптического пути, а значит, и с аберрациями. Распределение штрихов на поверхности решетки при этом описывается формулой

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^{n/2} \sum_{k=0}^{n/2} X_i Y_k x^{2i} y^k,$$

где $X_0 Y_0 = 0$; $X_0 Y_1 = 2\pi N$, ближайшее целое значение $f(x, y)$ является номером штриха, который может быть как положительным, так и отрицательным (штрих номер 0 проходит через центр решетки), N – число штрихов на мм в центре решетки. Связь фазовых коэффициентов бинарной поверхности (при нормирующем радиусе, равном единице) с коэффициентами разложения в ряд функции оптического пути выражается формулами [2]

$$C_{\text{ZEMAX}} = 2\pi C_n$$

$$C_1 = H_{010} = 0, \quad C_2 = H_{100}, \quad C_3 = H_{020} / 2,$$

$$C_4 = H_{110} = 0, \quad C_5 = H_{200} / 2,$$

$$C_6 = H_{030} = 0, \quad C_7 = -H_{120} / 2, \quad C_8 = H_{210} = 0,$$

$$C_9 = -H_{300} / 6,$$

$$C_{10} = H_{040} / 24, \quad C_{11} = H_{130} = 0, \quad C_{12} = H_{220} / 6,$$

$$C_{13} = H_{310} = 0, \quad C_{14} = H_{400} / 24.$$

Каждый коэффициент H_{ijk} влияет на определенную аберрацию дифракционной решетки. Например, C_2 связан с расстоянием между штрихами решетки. Он равен отношению длины волны записи к расстоянию между штрихами в вершине решетки. C_3 связан с кривизной центрального штриха. Если C_3 равен нулю, проекция центрального штриха на плоскость, касательную к сферической поверхности решетки в ее центре, является прямой линией. Этот коэффициент определяет фокусировку в сагиттальной плоскости и используется для компенсации астигматизма первого порядка. C_5 характеризует линейное изменение шага решетки. Он показывает, насколько меридиональная фокальная кривая отличается от круга Роуланда, для которого $C_5=0$. C_9 характеризует меридиональную кому. Если $C_9=0$, меридиональная кома отсутствует на круге Роуланда. C_7 связан с сагиттальной комой, C_{14} определяет сферическую аберрацию, и т.д. Эти коэффициенты также однозначно связаны с коэффициентами неравномерности шага и углом наклона оси качения резца, являющимися технологическими параметрами для изготовления решетки на делительной машине:

$$H_{ijk} = \frac{\partial^{ij} n(y, z)}{\partial y^i \partial z^j}, \quad H_{010} = 0, \quad H_{100} = \frac{1}{d_0}, \quad H_{020} = \frac{\text{tg}\gamma}{d_0 R}, \quad H_{110} = 0, \quad H_{200} = \frac{\text{tg}\gamma - \mu R}{d_0 R},$$

$$H_{030} = 0, \quad H_{120} = -\frac{\mu \text{tg}\gamma}{d_0 R}, \quad H_{210} = 0, \quad H_{300} = \frac{2R(\mu^2 - \nu) - 3\mu \text{tg}\gamma}{d_0 R},$$

$$H_{040} = \frac{3\text{tg}\gamma(\mu R\text{tg}\gamma - 1)}{d_0 R^2}, H_{130} = 0, H_{220} = \frac{2\text{tg}\gamma(1 + 2\mu^2 R^2 - 2R^2\nu - \mu R\text{tg}\gamma)}{d_0 R^3},$$

$$H_{130} = 0, H_{400} = \frac{3\left(-2\mu^2 + 4\mu\nu + \frac{(1 + 4\mu^2 R^2 - 4R^2\nu)\text{tg}\gamma}{R^3} - \frac{\mu\text{tg}2\gamma}{R^2}\right)}{d_0}.$$

Они также связаны с параметрами записи голограммной решетки, когда для записи используются два точечных источника:

$$H_{010} = 0, H_{110} = 0, H_{030} = 0, H_{210} = 0, H_{130} = 0, H_{230} = 0,$$

$$H_{120} = \frac{\sin \gamma}{r_c^2} - \frac{\cos \gamma \sin \gamma}{Rr_c} - \frac{\sin \delta}{r_d^2} + \frac{\cos \delta \sin \delta}{Rr_d},$$

$$H_{200} = -\frac{\cos \gamma}{R} + \frac{\cos^2 \gamma}{r_c} + \frac{\cos \delta}{R} - \frac{\cos^2 \delta}{r_d},$$

$$H_{120} = \frac{\sin \gamma}{r_c^2} - \frac{\cos \gamma \sin \gamma}{Rr_c} - \frac{\sin \delta}{r_d^2} + \frac{\cos \delta \sin \delta}{Rr_d},$$

$$H_{200} = \frac{3 \cos \gamma \sin \gamma (R \cos \gamma - r_c)}{Rr_c^2} - \frac{3 \cos \delta \sin \delta (R \cos \delta - r_d)}{Rr_d^2},$$

$$H_{040} = \frac{3}{4} \left[\frac{4(R - r_c \cos \gamma)}{R^2 r_c} - \frac{\left(2 - \frac{2r_c \cos \gamma}{R}\right)^2}{r_c^2} - \frac{4(R - r_d \cos \delta)}{R^2 r_d} - \frac{\left(2 - \frac{2r_d \cos \delta}{R}\right)^2}{r_d^2} \right],$$

$$H_{220} = \frac{1}{4} \left[\frac{4(R - r_c \cos \gamma)}{R^2 r_c} - \frac{\left(2 - \frac{2r_c \cos \gamma}{R}\right)^2}{r_c^2} - \frac{4(R - r_d \cos \delta)}{R^2 r_d} + \frac{\left(2 - \frac{2r_d \cos \delta}{R}\right)^2}{r_d^2} + \frac{6\left(2 - \frac{2r_c \cos \gamma}{R}\right) \sin^2 \gamma}{r_c^2} - \frac{\left(2 - \frac{2r_d \cos \delta}{R}\right) \sin^2 \gamma}{r_d^2} \right],$$

$$H_{440} = \frac{3}{4} \left\{ \frac{4(R - r_c \cos \gamma)}{R^2 r_c} - \frac{\left(2 - \frac{2r_c \cos \gamma}{R}\right)^2}{r_c^2} - \frac{4(R - r_d \cos \delta)}{R^2 r_d} + \frac{\left(2 - \frac{2r_d \cos \delta}{R}\right)^2}{r_d^2} + \frac{12\left(2 - \frac{2r_c \cos \gamma}{R}\right) \sin^2 \gamma}{r_c^2} - \frac{20 \sin^4 \gamma}{r_c^2} - \frac{12\left(2 - \frac{2r_d \cos \delta}{R}\right) \sin^2 \delta}{r_d^2} + \frac{20 \sin^4 \delta}{r_d^2} \right\}.$$

После нахождения оптимальных фазовых коэффициентов необходимо сконструировать такую схему записи, которая обеспечит реализацию этих коэффициентов. Изменить значения фазовых коэффициентов можно при помощи введения в схему записи дополнительных элементов – линз, зеркал и дифракционных решеток. Пример такой схемы записи показан на рис. 2.

Моделируется такая система пятью сферическими поверхностями, две пропускающие, одна отражающая и снова две пропускающие в обратном порядке. Последняя пропускающая поверхность преобразуется в отражательную поверхность, описываемую теми же фазовыми коэффициентами, что и решетка, которую требуется записать. При этом знак расстояния от этой поверхности до поверхности изображения (которое совпадает с объектом – исходной точкой) не меняется на противоположный, как положено после отражения, а остается прежним. Знак порядка дифракции меняется на противоположный по

сравнению с тем, в котором решетка должна работать в спектрометре. Изображение точки в данной модели оптимизируется до идеального качества. Параметрами оптимизации являются: расстояние от точечного источника до заготовки; радиус кривизны задней поверхности заготовки; толщина заготовки; расстояние от заготовки до отражательного элемента; угол наклона отражательного элемента; радиус кривизны отражательного элемента и другие его параметры, если он является дифракционным. При оптимизации не должно нарушаться условие встречи каждого луча с его собственным отражением на поверхности фоторезиста.

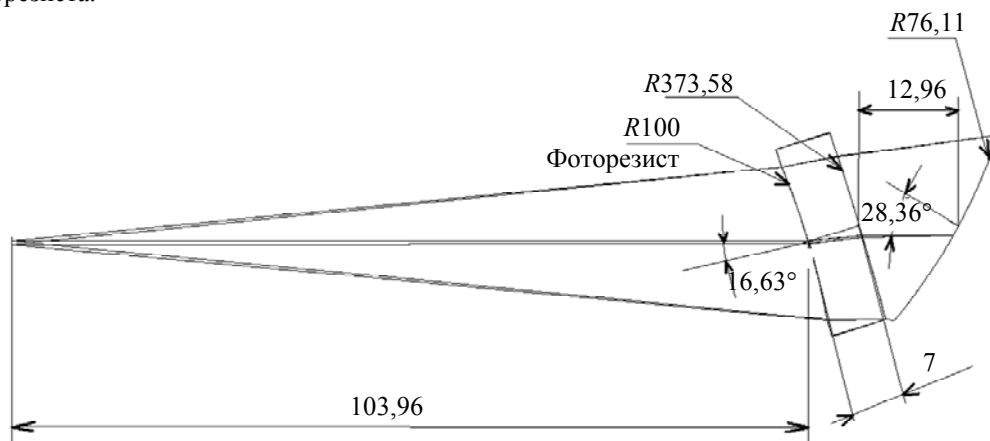


Рис. 2. Модель схемы записи решетки при помощи падающего и отраженного пучка

Следует отметить, что дифракционные решетки, записанные при помощи падающего и отраженного пучков, в отличие от решеток, записанных в попутных пучках, имеют треугольную форму штрихов, т.е. являются решетками с блеском. Длина волны блеска дифракционных решеток, записанных при помощи установок, построенных по схемам, подобным оптической схеме, показанной на рис. 2, определяется расстоянием между пучностями стоячих волн в слое фоторезиста, которое, в свою очередь, зависит от длины волны лазера и показателя преломления фоторезиста. Согласно результатам работ [3–6], она приблизительно равна половине длины волны лазерного излучения. Таким образом, в случае использования излучения аргонового лазера с длиной волны 457,9 нм длина волны блеска приблизительно равна 228,95 нм. Более подробный расчет эффективности дифракционных решеток может быть выполнен, например, при помощи программы PCGrate [7], алгоритм которой разработан на основе электромагнитной теории [8]. Программы оптического дизайна не позволяют проводить энергетические расчеты, выходящие за рамки скалярной теории.

Заключение

В работе показано, как при помощи программы ZEMAX могут быть построены модели спектрометров с дифракционными решетками, изготовленными с использованием различных технологий. Приведены разъяснения того, как параметры оптимизации дифракционной решетки связаны с технологическими параметрами ее изготовления, а также формулы, описывающие эту связь. Выявлены ограничения, которые необходимо учитывать при оптимизации оптических схем спектрометров, чтобы получать технологически реализуемые результаты. Работа объединяет вопросы оптического дизайна спектрометра и технологию изготовления дифракционных решеток, показывает их однозначную связь.

Возможные варианты моделирования дифракционной решетки в зависимости от технологии ее изготовления представлены в таблице.

	Дифракционная решетка	Эллиптическая решетка	Голограмма	Оптическая и записанная голограмма	Бинарная поверхность
Делительная машина	+	+			+
Голограммная запись			+	+	+
Прямая запись лазерным или электронным пучком	+				+

Таблица. Возможные варианты моделирования дифракционной решетки в зависимости от технологии ее изготовления

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта 11.519.11.6014.

Литература

1. ZEMAX 12 OpticalDesignProgramUser'sManual, May 10, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiantzemax.com/en/support/downloads/zemax.aspx>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 18.10.2012).
2. Sokolova E. Simulation of Mechanically Ruled Concave Diffraction Gratings by Use of an Original Geometric Theory // Appl. Opt. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 20–28.
3. Sokolova E., Kruizinga B., Valkenburg T., Schaarsberg J. Recording of concave diffraction gratings in counterpropagating beams using meniscus blanks // J. Mod. Opt. – 2002. – V. 49. – № 11. – P. 1907–1917.
4. Hutley M.C. Diffraction Gratings. – London: Academic Press, 1982. – 330 p.
5. Hutley M.C. Concave diffraction gratings. – NPL report MOM 77. – Oct. 1985. – 28 p.
6. Пейсахсон И.В. Приближенная оценка эффективности отражательных дифракционных решеток // Оптический журнал. – 1997. – Т. 64. – № 11. – С. 53–57.
7. Kotov A., Golubenko I. PC Grate Series, ver. 3.0 // User's Manual, St. Petersburg, Russia, 1999. – P. 5–11.
8. Голубенко И.В. Численный анализ свойств голограммных отражательных дифракционных решеток: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Гос. оптич. ин-т. им. С.И. Вавилова, 1987. – 183 с.

- Васильев Владимир Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, член-корр. РАН, ректор, Vasilev@mail.ifmo.ru
- Воронцов Дмитрий Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, dimitrion@hotmail.ru
- Драгунов Александр Иванович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, AlexDragunov27@yandex.ru
- Лившиц Ирина Леонидовна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, Ecenter-optica10@yandex.ru
- Соколова Елена Алексеевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, ст. научный сотрудник, elena@scarlet.nl