

24. Дифракционная эффективность решеток с ошибками профиля рельефа

М. В. Шишова, А. Ю. Жердев, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В работе исследуются высокочастотные дифракционные решетки с определенными ошибками профиля рельефа из-за технологических особенностей изготовления. Для описания данных ошибок проанализированы профили тестовых образцов. Линейная модуляция периода или неточность стыковки фреймов оказывают существенное влияние на дифракционную эффективность или даже могут привести к функциональным сбоям. Для анализа потерь дифракционной эффективности в связи с присутствием внутри периода различных ошибок профиля проведено моделирование дифракции монохроматической волны на высокочастотных фазовых дифракционных решетках.

Ключевые слова: Дифракционные решетки, Дифракционная эффективность.

Цитирование: Шишова, М. В. Дифракционная эффективность решеток с ошибками профиля рельефа / М. В. Шишова, А. Ю. Жердев, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 109–114.

Введение

Интерферометрические датчики линейных перемещений формируют квадратурные сигналы перемещения с помощью двух фазовых дифракционных решеток [1, 2]. Пропускающая дифракционная решетка расположена в измерительной головке датчика и называется анализирующей шкалой. Она выполняет функцию делителя по амплитуде, а также перенаправляет излучение на фотоприемники. От формы профиля рельефа анализирующей шкалы зависит результирующая разность фаз между интерференционными сигналами перемещений или квадратурными сигналами. Отражательная дифракционная решетка называется кодирующей шкалой, так как отвечает за модуляцию сигнала в процессе перемещения. Качество выполнения этих шкал существенно влияет на результирующее разрешение датчика линейных перемещений.

В последние годы совершенствование процесса изготовления дифракционных решеток для датчиков линейных перемещений стало своеобразной тенденцией в этой области исследования [1–4]. Мастер образцы измерительных шкал можно изготавливать нарезным, голографическим или литографическим методами. У каждого есть свои достоинства и недостатки, но в любом из случаев технологические возможности метода должны обеспечивать минимальное отклонение периода дифракционных структур. Электронно-лучевая литография позволяет получить профили в форме меандра с определенным фактором заполнения и высотой. Такая реализация рельефа необходима для анализирующей шкалы, чтобы в итоге обеспечить разность фаз в квадратурных сигналах.

В работе представлено моделирование дифракции на пропускающих фазовых дифракционных решетках. На его основе проведена количественная оценка потерь дифракционной эффективности из-за присутствия ошибок в профиле решеток. Для постановки задачи на моделирование и описания характерных ошибок профиля на внутри периода исследованы образцы дифракционных решеток, полученные методом электронно-лучевой литографии.

1. Литографические дифракционные решетки

Электронно-лучевая литография в основном применяется для изготовления электронных компонентов микро- и наномасштаба, но также и для получения дифракционных оптических компонентов, когда требуется высокое разрешение. Литографы позволяют формировать рельефы с топологическими особенностями размером до 10 нм. Но несмотря на высокое разрешение, в структуре проявленного дифракционного элемента присутствуют определённые дефекты, в частности несоответствие профиля рельефа желаемому. В данной работе рассматриваются фазовые дифракционные решетки с ошибочным рельефом, проводится моделирование дифракции и исследуется влияние присутствия определенных ошибок на дифракционную эффективность. Стоит отметить, что большинство ряд дефектов, к примеру, линейная модуляция периода, появляются в структуре в процессе записи и могут быть скорректированы после тестов.

Рассмотрим общие возможности современных литографов на примере характеристик системы Raith Voyager [5], которая главным образом используется для изготовления дифракционных оптических элементов, защитных оптических элементов и изготовления полупроводниковых устройств. Прямая высокоскоростная запись литографа позволяет обеспечить разрешение до 10 нм на периодах до 40 нм при ускоряющем напряжении электронного пучка от 10 до 50 кВ, токе от 50 пА до 40 нА, с минимальной адресной сеткой до 0,5 нм в поле 500 мкм. При этом максимальная зона экспозиции составляет 500 мкм² с возможностью фокусировки фокуса в реальном времени. Для дифракционных элементов особо важно минимизировать ошибку стыковки фреймов записи: для рассматриваемого литографа эта величина составляет 25 нм (+3σ) в поле 100 мкм² и 35 нм (+3σ) в поле 500 мкм². Выполнение представленных предельных условий на практике позволяет изготовить дифракционные структуры с неразличимыми фреймами и высоким постоянством периода.

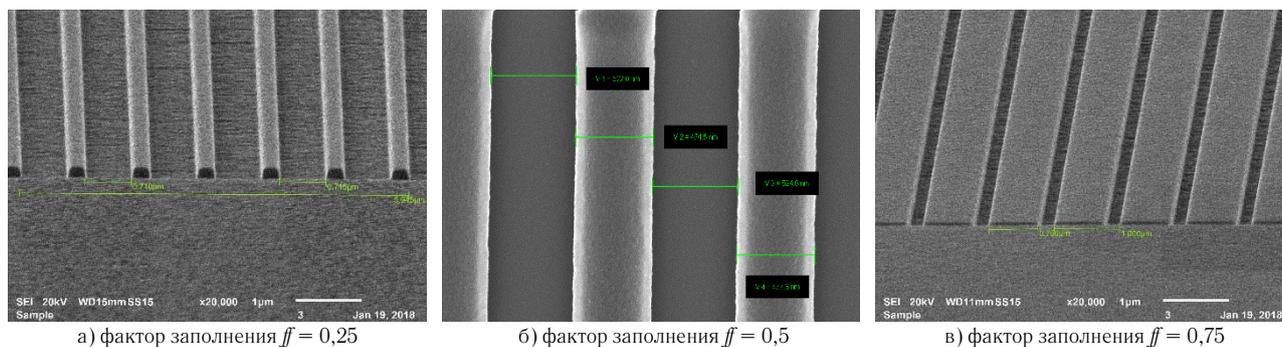
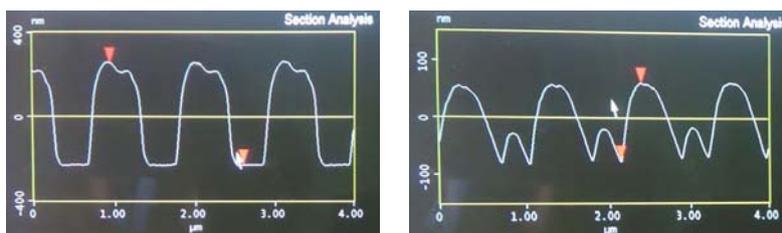
а) фактор заполнения $ff = 0,25$ б) фактор заполнения $ff = 0,5$ в) фактор заполнения $ff = 0,75$

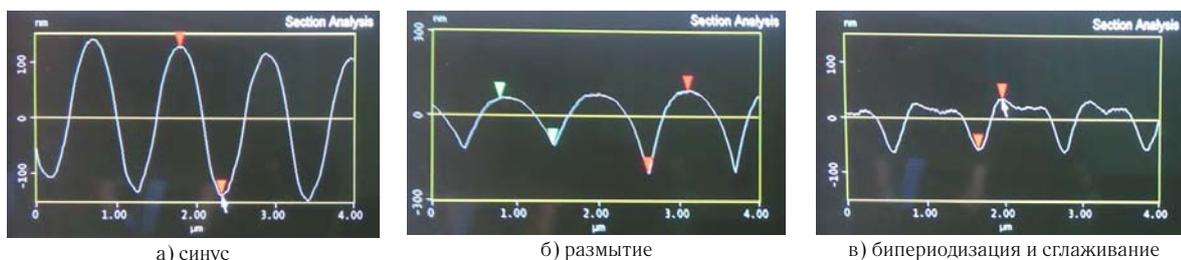
Рис. 1. Изображение образцов литографических решеток высокого качества



а) бипериодизация в зоне выступов

б) бипериодизация в зоне впадин

Рис. 2. Профилограммы, иллюстрирующие ошибку бипериодизации



а) синус

б) размытие

в) бипериодизация и сглаживание

Рис. 3. АСМ профилограммы, иллюстрирующие размытие рельефа

Тестовый анализ режимов работы литографа при нанесении $64,5 \pm 1$ нм слоя ПММА на пластинку диаметром 100 мм, позволяет оценить интегральную ошибку периода дифракционной решетки в рабочем поле и время, необходимое для записи.

1) Отклонение одного края канавки при токе 2 нА не больше 20 нм или ± 10 нм. Поэтому, погрешность ширины канавки составляет ± 20 нм, что практически соответствует предельным характеристикам литографа. Приблизительное время экспозиции зоны 15×5 мм² при таком токе составляет 30–40 часов.

2) Отклонение одного края канавки при токе 10 нА не больше 30 нм или ± 15 нм. Поэтому, погрешность ширины канавки составляет ± 30 нм. Приблизительное время экспозиции зоны 15×5 мм² при таком токе составляет 15–25 часов.

Изображения на рис. 1, полученные с помощью электронного микроскопа, иллюстрируют литографические дифракционные решетки с разным фактором заполнения ff («fill factor» — отношение ширины выступа в величине периода). Показанные образцы обладают высоким качеством: фреймы не различимы, погрешность ширины линии составляет около ± 20 нм. Данные дифракционные решетки изготовлены с на кремниевой подложке.

Таким образом современные литографические системы обладают широкими возможностями для изготовления дифракционных элементов, но прецизионность и масштабность дифракционных элементов требуют значительных временных и материальных ресурсов.

2. Типы ошибок профиля

Кроме ошибок стыковки фреймов, литографические решетки обладают локальными отклонениями профиля от желаемой формы. Они образуются как во время экспозиции, так и при последующем проявлении. Такие ошибки профиля в общем можно охарактеризовать как бипериодизация и сглаживание. На рис. 2 и 3 показаны профилограммы подобных рельефов, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии. Исследуемые здесь образцы дифракционных решеток выполнены на стеклянной подложке. Проявление того или иного отклонения непосредственно связано с характеристиками электронного резиста и типом подложки.

Ошибка бипериодизации определяется как присутствие добавочной периодизации в зоне выступов (рис. 3а) или в зоне впадин (рис. 3б). Ошибка сглаживания рельефа относится к размытию границ штриха с приближением формы к синусоидальной (рис. 4а), а

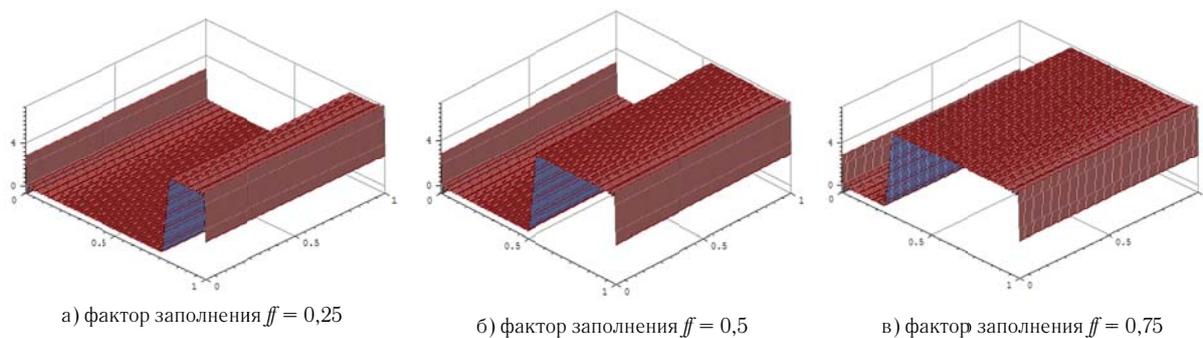


Рис. 4. Модель бинарного профиля с различным фактором заполнения

также с разрушением зоны канавок (рис. 4б). Последнее приближает рельеф к форме модуля синуса, при этом на длине нескольких периодов может наблюдаться модуляция высоты.

Исследование характеристик дифракционной эффективности решеток с описанными ошибками профиля рельефа проводится с помощью моделирования. Проводится сравнение полученных зависимостей с аналогичными для бинарного профиля. Отклонения профиля рельефа закладываются при формировании задачи: в случае бипериодизации высота добавочной структуры в зоне впадин составляет около 10 % от общей высоты профиля и 20 % в зоне выступов. При размытии рельефа профиль представляется как синусоидальный, а также рассматриваются два случая с разрушением зоны канавок внутри одного периода и с линейной модуляцией высоты на протяжении трех периодов.

3. Моделирование

Численное решение прямой задачи проводилось с использованием программного обеспечения MC Grating на основе метода Шандезона [7, 8], подходящего для моделирования решеток с гладким профилем. К анализу представляются зависимости дифракционной эффективности для 0-го (η_0) и ± 1 -го порядков дифракции (η_1) от высоты профиля рельефа h в диапазоне от 50 до 650 нм для периода 1 мкм и освещении полосокой монохроматической волной с длиной волны 660 нм. Предполагается, что +1 и -1 обладают равной эффективностью в силу высокой степени симметрии профиля.

Сначала проводится моделирование бинарного профиля для получения желаемых зависимостей, относительно которых будет осуществляться сравнение. На рис. 4 показаны профили решетки с различным фактором заполнения ff : 0,25; 0,5 и 0,75. Моделируемые дифракционные решетки соответствуют экспериментальным тестовым образцам, показанным на рис. 1.

Полученные зависимости для бинарных геометрий профиля показаны на рис. 5. Все три характеристики имеют одинаковый вид: $\eta_1(h)$ увеличивается при увеличении высоты и $\eta_0(h)$ соответственно уменьшается. Для симметричного профиля $ff = 0,5$ (рис. 4б) характеристики дифракционной эффективности для нулевого и первых порядков пересекаются в точке

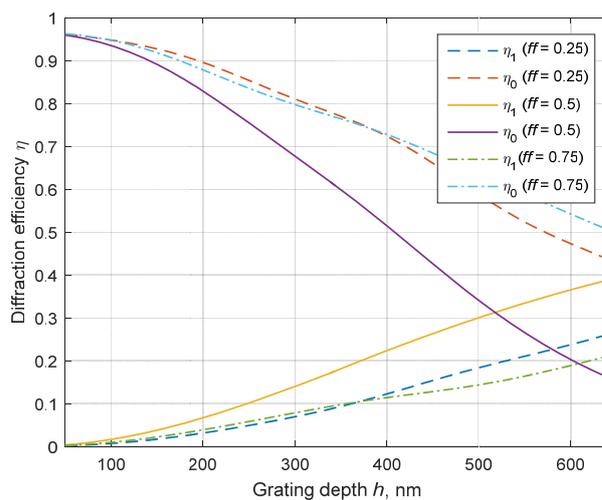
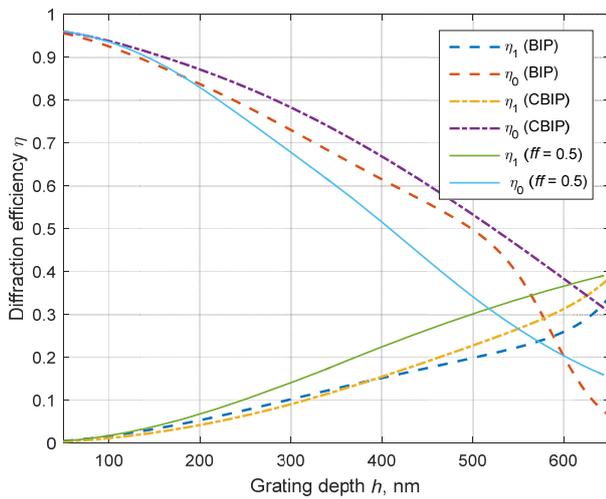


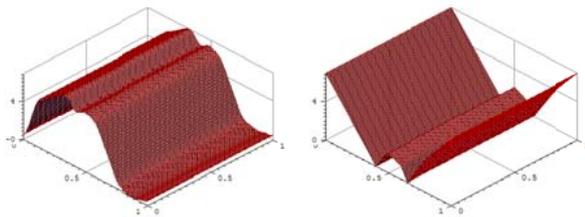
Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от высоты профиля рельефа для бинарной решетки с различным фактором заполнения

$h_{opt} = 518$ нм, будем называть это значение оптимальной высотой, так как при нем обеспечивается равномерное распределение энергии в порядки дифракции: $\eta(h_{opt}) = 31,5$ %. Для рельефов с другими рассматриваемыми факторами заполнения $ff = 0,25$ (рис. 4а) и $ff = 0,75$ (рис. 4в) $\eta_0(h)$ выше и $\eta_1(h)$ ниже соответствующих характеристик для симметричного профиля, как показано на рис. 5. Для сравнения дифракционной эффективности для принятой высоты h_{opt} . В случае, когда $ff = 0,25$, $\eta_0(h_{opt}) = 56,4$ % и $\eta_1(h_{opt}) = 19,4$ %; в случае, когда $ff = 0,75$, $\eta_0(h_{opt}) = 62$ % и $\eta_1(h_{opt}) = 15,1$ %.

Результаты моделирования поведения дифракционной эффективности в присутствии бипериодизации показаны на рис. 6. На графике описанные выше отклонения названы: ВІР (biperiodization) для зоны выступов (рис. 2а) и СВІР (biperiodization in cavity zone) для бипериодизации в зоне впадин (рис. 2б). Для обоих случаев, оптимальная точка сдвигается в область более глубоких профилей: 588 нм и 24,9 % для дополнительной периодизации в зоне выступов; 625 нм и 34,4 % для периодизации в зоне канавок. Это также связано с уменьшением ширины канавок. В сравнении с симметричным профилем для ошибки ВІР $\eta_0(h_{opt}) = 62$ % и $\eta_1(h_{opt}) = 15,1$ %; для ошибки СВІР $\eta_0(h_{opt}) = 50,5$ % и $\eta_1(h_{opt}) = 24$ %.



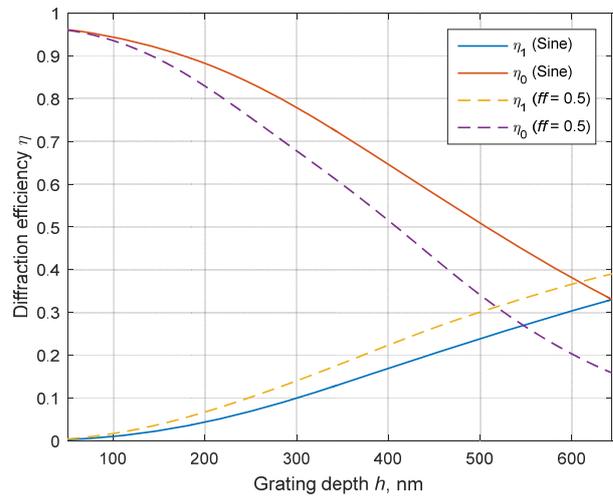
а)



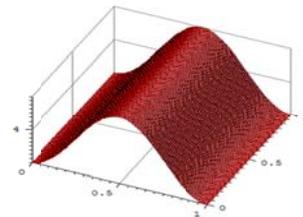
б) BIP

в) CBIP

Рис 2. Зависимость дифракционной эффективности от профиля рельефа при наличии добавочной периодизации в зоне выступов (BIP) или в зоне впадин (CBIP)



а)



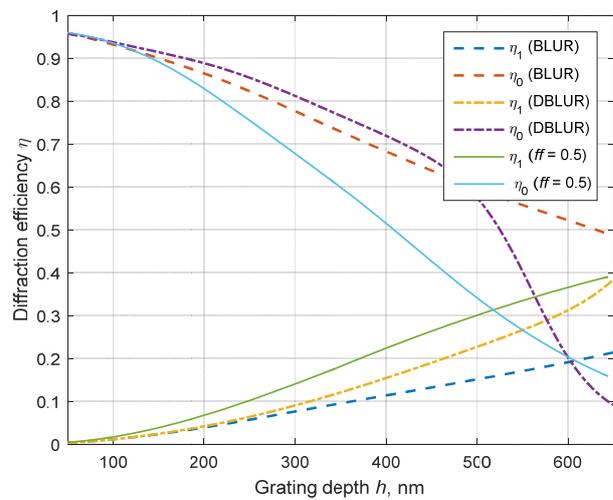
б) SIN

Рис 3. Зависимость дифракционной эффективности от высоты для прямоугольного и синусоидального профилей

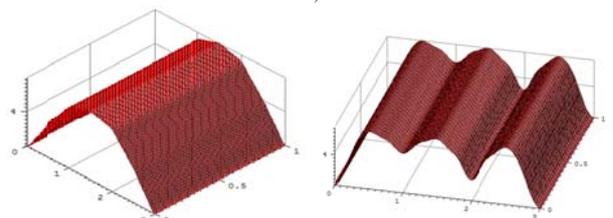
Далее проведено моделирование для синусоидального профиля рельефа. На рис. 7 показано изменение дифракционной эффективности при аппроксимации симметричного бинарного профиля синусоидальным. Тип ошибки назовем SIN. Оптимальная точка также смещается в область глубоких рельефов с технологически нереализуемой высотой: 645 нм обеспечивает дифракционную эффективность 33 %.

Последним проводится моделирование для описанных ошибок сглаживания рельефа в пределах одного периода и с линейной модуляцией высоты (рис. 8). Функции профилей соответствуют представленным на рис. 3б: BLUR (blurring) для деструктуризации впадин и DBLUR (depth blurring) для аналогичного разрушения структуры, но с модуляцией высоты профиля на протяжении трех периодов.

Присутствие описанных ошибок приводит к смещения оптимальной высоты профиля в сторону ее увеличения: глубина дифракционной решетки становится равной 577 нм и дифракционная эффективность уменьшается до 29 % для ошибки типа BLUR. Для ошибки типа DBLUR, характеристики дифракционной эффективности теряют пересечение. При сравнении с бинарным профилем с фактором заполнения $ff = 0,5$ для BLUR типа ошибок $\eta_0(h_{opt}) = 52,4 \%$ и $\eta_1(h_{opt}) = 24,1 \%$; для DBLUR типа ошибок $\eta_0(h_{opt}) = 58,2 \%$ и $\eta_1(h_{opt}) = 15,8 \%$. Эти характеристики приближены к случаю моделирования при задании профиля с фактором заполнения $ff = 0,75$.



а)



б) BLUR

в) DBLUR

Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности от профиля рельефа при разрушении структуры впадин (BLUR) и при аналогичном сглаживании с модуляцией глубины на трех периодах (DBLUR)

Табл. 1. Результаты оценки потерь дифракционной эффективности

Тип рельефа	Параметр оценки					
	Дифракционная эффективность в 0-ом порядке $\eta_0(h_{opt})$, %	Дифракционная эффективность в 1-ом порядке $\eta_1(h_{opt})$, %	Отклонение дифракционной эффективности в 0-ом порядке $\Delta\eta_0(h_{opt})$		Отклонение дифракционной эффективности в 1-ом порядке $\Delta\eta_1(h_{opt})$	
			Абсолютное, %	Относительное	Абсолютное, %	Относительное
Бинарный профиль $ff = 0,5$	31,5	31,5	—	—	—	—
Бинарный профиль $ff = 0,25$	56,4	19,4	24,9	0,79	12,1	0,38
Бинарный профиль $ff = 0,75$	62,0	15,1	30,5	0,97	16,4	0,52
Бипериодизация выступов VIP	47,0	20,5	15,5	0,49	11,0	0,35
Бипериодизация впадин CBIP	50,5	24,0	19,0	0,60	7,5	0,24
Синусоидальное сглаживание SIN	48,5	25,1	17,0	0,54	6,4	0,20
Разрушение канавок BLUR	52,4	24,1	20,9	0,66	7,4	0,23
Разрушение канавок с модуляцией глубины DBLUR	58,2	15,8	26,7	0,84	15,7	0,50

Заключение

Литографический метод обладает большими возможностями при изготовлении фазовых периодических структур, обеспечивая постоянство периода и высокую точность рельефа. Тем не менее, технологический процесс вносит определённые ошибки в форму профиля. Моделирование, представленное в данной работе позволяет оценить потери, возникающие при дополнительной периодизации дифракционных структур и сглаживании профиля.

В табл. 1 представлены результаты количественной оценки после моделирования дифракции в присутствии различных ошибок профиля. Сравнение дифракционных эффективностей проводилось относительно симметричного прямоугольного профиля для выбранного значения высоты рельефа (518 нм).

Моделирование дифракции на решетках с локальными ошибками формы профиля подтвердило, что

описанные структуры можно применять по назначению, предполагая снижение дифракционной эффективности. В различных случаях при сглаживании профиля, потере структуры впадин и появлении дополнительной периодизации, наблюдаются существенные потери эффективности как в нулевом, так и в первых максимумах, количественно представленные в табл. 1. Потери дифракционной эффективности в первом порядке достигают 84 % в относительной мере. Сглаживание прямоугольного профиля с приближением к синусоидальной форме оказывает наименьшее влияние на эффективность.

Благодарность

Благодарность лаборатории Функциональные микро и нанолографические системы, а также ФГУП «НТЦ «Атлас» за возможность экспериментального исследования образцов дифракционных решеток.

Список источников

- [1] Hausotte T. Interference signal demodulation for nanopositioning and nanomeasuring machines / T. Hausotte, B. Percle, U. Gerhardt, D. Dontsov, E. Manske and G. Jäger // Meas. Sci. Technol. — 2012. — Vol. 23, 074004, 8 pp. — DOI: 10.1088/0957-0233/23/7/074004.
- [2] Shishova M. V. Mathematical modeling of signal transfer process into linear displacement encoder optical system / M. V. Shishova, S. B. Odinkov, D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev, O. A. Gurylev // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 201. — P. 623–629. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.676.
- [3] Gao W. Measurement technologies for precision positioning / W. Gao, S. W. Kim, H. Bosse, H. Haitjema, Y. L. Chen, X. D. Lu, W. Knapp, A. Weckenmann, W. T. Estler, H. Kunzmann // CIRP Annals: Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 64. — № 2. — P. 773–796.
- [4] Munnig Schmidt R. Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry / R. Munnig Schmidt // Phil. Trans. R. Soc. A. — 2012. — No. 370. — P. 3950–3972.
- [5] Electron beam lithography system VOYAGER / URL: <https://www.raith.com/products/voyager.html> (Дата обращения 08.06.18)
- [6] Li X. Analysis of signal distortion caused by opening ratio variation of main scale and index scale in linear encoder / X. Li, L. Yin, Y. Shi, G. Ye, H. Yu, and H. Liu // Advanced Materials Research. — 2013. — Vols. 712–715. — P. 1833–1837.
- [7] Fan S. A study on the fabrication of main scale of linear encoder using continuous roller imprint method / S. Fan, Y. Shi, L. Yin, L. Feng, and H. Liu // SPIE Proceedings. — Vol. 8916, 3W. — DOI: 10.1117/12.2035762.

- [8] **Chandezon J.** A new theoretical method for diffraction gratings and its numerical application / J. Chandezon, D. Maystre, G. Raoult // J. Optics (Paris). — 1980. — Vol. II. — P. 235–241.
- [9] **Lifeng Li.** Some topics in extending the C method to multilayer gratings of different profiles // Lifeng Li, G. Granet, J. P. Plumey, and J. Chandezon // Pure Appl. Opt. — 1996. — Vol. 5. — P. 141–156.

Diffraction efficiency of the gratings with period cell errors

M. V. Shishova, S. B. Odinokov, D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

That paper focuses on diffraction gratings with period errors provided by the errors of the electron-beam lithography method. Samples of lithographic phase gratings were tentatively analyzed to describe that technological errors. A small linear modulation of the period or a joint of a frame edges can cause not only diffraction efficiency losses but also functional breakdown. A simulation of the diffraction of a monochromatic wave at the described diffraction phase structures is carried out. Described diffraction gratings are applied in field of linear displacement encoders.

Keywords: E-beam lithography, Diffraction grating, Period error, Diffraction simulation.