

ПРОПУСКАЮЩИЕ НАРЕЗНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ, ВИДИМОЙ И ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЕЙ СПЕКТРА

© 2014 г. М. Ю. Знаменский; Я. К. Лукашевич, канд. техн. наук;
А. Ф. Скочиллов, канд. физ.-мат. наук; Н. А. Федулова

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

Рассмотрены пропускающие нарезные дифракционные решетки. Даны рекомендации по выбору их конструкции и параметров, обеспечивающих достижение высокой дифракционной эффективности в заданной области спектра, в частности по определению оптимальных частот штрихов. Приведены примеры реально применяемых дифракционных решеток для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра, и показана хорошая корреляция между их расчетными и экспериментальными характеристиками.

Ключевые слова: дифракционная решетка, нарезные дифракционные решетки, пропускающие дифракционные решетки, дифракционная эффективность.

Коды OCIS: 050.0050; 050.1950.

Поступила в редакцию 23.07.2013.

Пропускающие дифракционные решетки используются как диспергирующие [1] и светоделительные [2, 3] элементы в оптических приборах и аппаратуре различного назначения. В сочетании с призмой пропускающая решетка образует оптический элемент, называемый гризмой, в котором рабочий пучок одного из порядков дифракции проходит без отклонения от первоначального направления. Соответственно назначению предъявляются требования к основным характеристикам решеток: для диспергирующих элементов требуется высокая дифракционная эффективность (ДЭ) в рабочем диапазоне спектра, для делителей пучков – заданное соотношение коэффициентов пропуска в рабочих порядках спектра. В зависимости от назначения и условий эксплуатации пропускающие решетки изготавливаются как в виде оригиналов из материалов прозрачных в заданной области спектра, так и в виде реплик, полученных с решеток-матриц. В связи с этим полезно рассмотреть возможности и ограничения нарезной технологии и представить рекомендации по выбору дифракционных решеток, которые можно реально изготовить в производственных условиях.

В настоящей статье приведены результаты работ по получению прозрачных решеток,

используемых в качестве диспергирующих элементов, в основном, методом копирования с нарезных дифракционных решеток-матриц [4]. В большинстве случаев для копирования используются нарезные дифракционные решетки со ступенчатым профилем штрихов, как наиболее эффективные в широкой области спектра. Известно, что предельная длина волны рабочей области спектра решетки определяется полным внутренним отражением света на гранях штрихов [5]. С учетом этого условия подбираются материал для подложки решетки и копирующие материалы с соответствующими коэффициентами преломления. Наиболее подходящим по оптическим и эксплуатационным характеристикам для широкой области спектра является кварцевое стекло во всех его модификациях: КУ, КВ и КИ. В тех случаях, когда не требуются высокие эксплуатационные характеристики, используется стекло марки К-8, как наиболее однородное, технологичное в обработке и дешевое по сравнению с другими марками стекол. В качестве копирующего материала для выполнения штрихов решетки нами использовалась полиэфирная смола ПГМФ. В отдельных случаях для копирования использовалась смола ТГМ-3.

При изготовлении решеток-оригиналов для последующего копирования их штрихи формируют алмазным резцом в алюминиевом слое, нанесенном на стеклянную подложку. Таким способом геометрию профиля штрихов можно варьировать в широких пределах, ограничением которых являются предельно достижимые углы заточки граней алмазных резцов и соответствующие им углы граней штрихов.

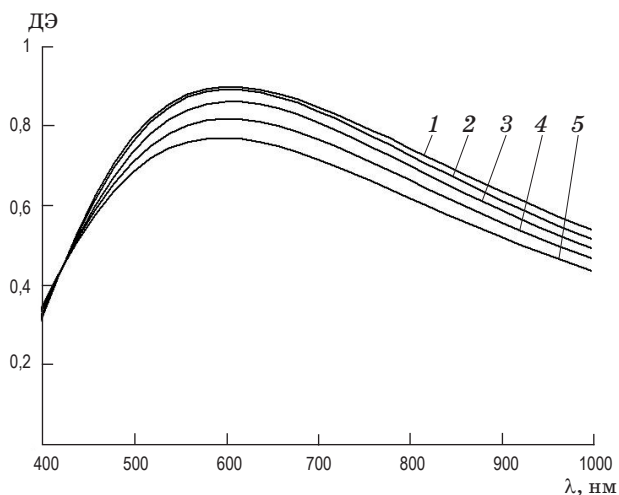


Рис. 1. Графики расчетных значений ДЭ решетки с углом «блеска» $7,7^\circ$ и частотой 100 мм^{-1} для различных значений углов между гранями штрихов: 1 – 80° , 2 – 90° , 3 – 100° , 4 – 110° , 5 – 120° .

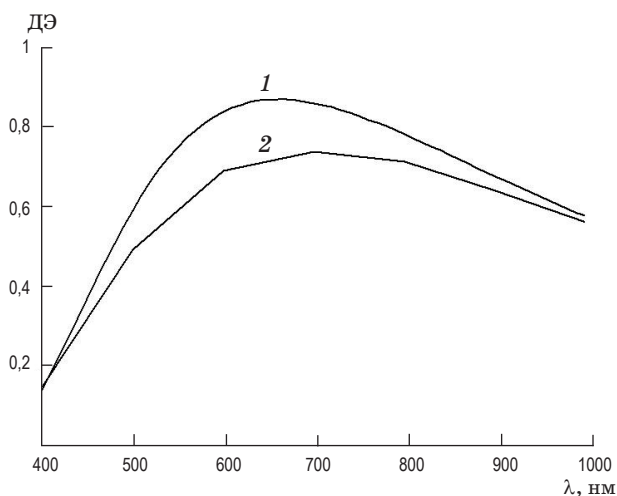


Рис. 2. Графики пропускания для расчетной конструкции профиля штрихов решетки с частотой 100 мм^{-1} (угол «блеска» – 7° , угол между гранями штрихов решетки – 90°) – 1 и для реальной решетки с такой же частотой (угол «блеска» – 7° , угол между гранями штрихов решетки – 105°) – 2.

Одним из основных параметров решетки является угол «блеска», которым определяется область максимальной ДЭ. Этот угол между поверхностью решетки и рабочей гранью ее штрихов, помимо ограничений при изготовлении резца, существенно зависит от технологических особенностей формирования штрихов, обусловленных релаксацией слоя алюминия. Так, например, при угле заточки резца равном 50° , угол «блеска» для решетки с частотой 1200 мм^{-1} получается равным примерно 44° , а для решетки с частотой 600 мм^{-1} – 46° . Известно, что с уменьшением угла между гранями штрихов увеличивается дифракционная эффективность решетки [6]. В качестве примера на рис. 1 приведены расчетные значения дифракционной эффективности решетки с углом «блеска» $7,7^\circ$ и частотой 100 мм^{-1} для различных значений углов между гранями штрихов. При этом следует принимать во внимание то, что возможности технологии заточки алмазных резцов ограничены значениями примерно 90° между гранями. Вторым ограничением является то, что для обеспечения малых углов «блеска» невозможно сохранить оптимальный угол между гранями штрихов. Конструкция алмазных резцов для нарезания дифракционных решеток и технология их изготовления ограничивают максимальный угол заточки их граней на уровне $70\text{--}75^\circ$. Так, например, для получения реальной решетки с частотой 100 мм^{-1} , работающей в области спектра $400\text{--}1000 \text{ нм}$, угол «блеска» составляет 7° , при этом угол заточки нерабочей грани алмазного резца реально составляет 70° . Расчетный угол между гранями штрихов для этой решетки составляет 103° , реальный же, из-за релаксации слоя алюминия при нарезании решетки, получается примерно 105° .

На рис. 2 приведены графики пропускания для расчетной конструкции профиля штрихов решетки с частотой 100 мм^{-1} (угол «блеска» – 7° , угол между гранями штрихов решетки – 90°) и реальной решетки с такой же частотой (угол «блеска» – 7° , угол между гранями штрихов решетки – 105°).

Нами были проведены расчеты ДЭ решеток с одинаковой частотой для различных углов «блеска». На рис. 3 приведены графики ДЭ нарезной решетки с частотой 150 мм^{-1} , выполненной алмазным резцом с углом заточки граней примерно 90° для углов «блеска» 30° , 40° и 50° . Видно, что увеличение угла «блеска»

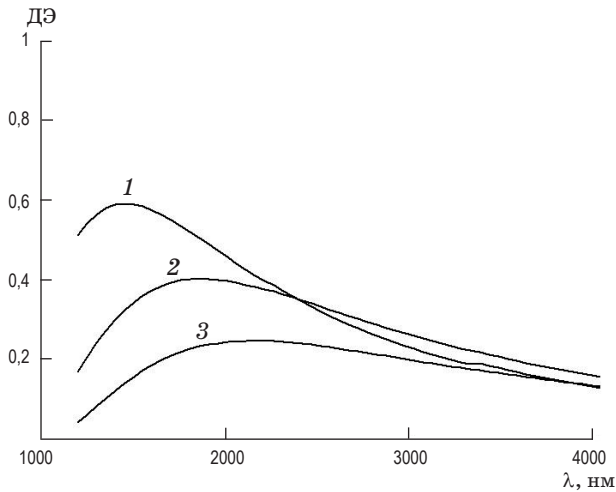


Рис. 3. Графики ДЭ нарезной решетки с частотой 150 мм^{-1} , выполненной алмазным резцом с углом заточки граней примерно 90° для различных углов «блеска»: 1 – 30° , 2 – 40° , 3 – 50° .

решеток до значений выше 40° приводит к заметному уменьшению ДЭ в коротковолновой части рабочей области и сохранению ее значения в длинноволновой части. Следовательно, для достижения высокой ДЭ в заданной спектральной области необходимо уменьшать частоту штрихов для длинноволновой области и увеличивать для коротковолновой. Достоверность расчетных значений была проверена на ряде экспериментальных и рабочих образцов. На рис. 4 и 5 приведены графики распределения ДЭ расчетных и реальных решеток с частотами 50, 100, 120, 150, 300 и 600 мм^{-1} . Причиной наблюдаемых расхождений значений коэффициентов пропускания для решеток с одной частотой является несоответствие реального профиля штрихов его расчетному геометрическому образу: на вершинах штрихов реальных решеток-оригиналов имеются так называемые «навалы» алюминиевого слоя, образующиеся в процессе формирования штрихов из-за пластической деформации слоя металла, формуемого алмазным резцом, которые искажают расчетную геометрию штрихов. Также этому может способствовать неточность профиля решетки.

Пропускающие решетки-оригиналы в прозрачных пластичных материалах получали непосредственным формированием штрихов на поверхности подложки. Для получения аналогичных решеток в хрупких материалах штрихи сначала выполнялись в слое алюминия, нане-

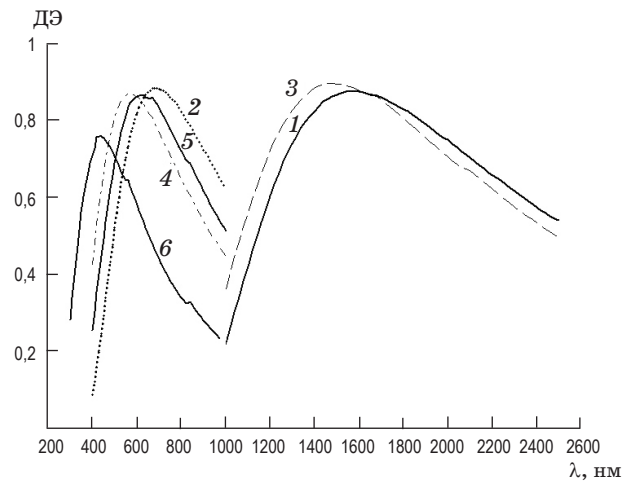


Рис. 4. Графики распределения ДЭ расчетных решеток с различными частотами: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 120, 4 – 150, 5 – 300, 6 – 600 мм^{-1} .

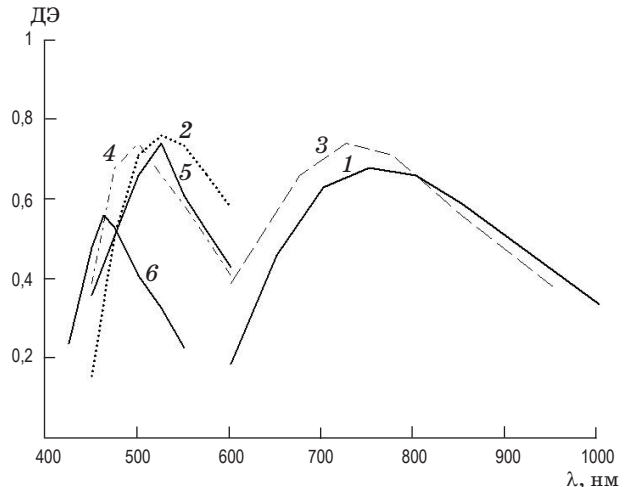


Рис. 5. Графики распределения ДЭ реальных решеток с различными частотами: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 120, 4 – 150, 5 – 300, 6 – 600 мм^{-1} .

сенного на подложку, а затем переводились непосредственно в ее материал способом ионно-лучевой обработки. При специальном подборе материалов решетки или нанесении на нее дополнительных слоев можно увеличивать или уменьшать угол «блеска» между гранями штрихов.

Приведенные результаты работы позволят потребителю выбрать оптимальный вариант дифракционной решетки для его реального применения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлычева Н.К., Муслимов Э.Р. Спектрограф с плоским полем на основе вогнутой пропускающей голограммной дифракционной решетки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 4. С. 61–67.
2. Пальчикова И.Г., Рябчун А.М., Черков Г.А. Дифракционные оптические делители пучка // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 44–47.
3. Казанский Н.Л., Скиданов Р.В. Бинарный делитель пучка // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 3. С. 329–334.
4. Нижин А.М., Торбин И.Д., Митина Ф.А. Копии оптических поверхностей на слое алюминия // ЖПС. 1971. Т. 15. № 1. С. 145–147.
5. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А. Дифракционные решетки. Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, 1982. 70 с.
6. Huttley M.C. Diffraction Gratings. London, New York: Academic Press, 1982. 330 p.