

## Автоколлимационные дифракционные решетки на основе волноводов с модами утечки

В.А.Сычугов\*, Б.А.Усиевич\*, К.Е.Зиновьев\* О.Парьё\*\*

Показана исключительно важная роль мод утечки многослойных гофрированных диэлектрических и металлодиэлектрических структур для достижения высокой эффективности работы таких структур в качестве дифракционной решетки. Рассмотрены три типа решетчатых структур: гофрированный волноводный слой на плоском многослойном диэлектрическом зеркале (тип 1), многослойное диэлектрическое зеркало на гофрированной подложке (т.е. полностью гофрированная структура) (тип 2) и структура промежуточного типа (тип 3). Проведено сопоставление рабочих характеристик этих структур при использовании их в режиме Литтрова. Экспериментально реализована решетка на основе двухслойного волновода с модами утечки.

**Ключевые слова:** моды утечки, автоколлимационные дифракционные решетки, дифракционная эффективность.

### Введение

В работе [1] была предложена металлодиэлектрическая решетка, обладающая большой дифракционной эффективностью при работе в режиме Литтрова. Решетка представляет собой гофрированный слой диэлектрика, лежащий на плоской металлической подложке. Высокая эффективность структуры, как было показано в [2], является результатом волноводности диэлектрического слоя и существования мод утечки, эффективный показатель преломления которых  $n^* < 1$ , и определяется следующим соотношением:

$$2kh(n_f^2 - n^{*2})^{1/2} = (2m + 1)\pi, \quad (1)$$

где  $h$  и  $n_f$  – толщина и показатель преломления диэлектрического слоя;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения.

На рис.1 представлены дисперсионные кривые для мод утечки диэлектрического слоя с  $n_f = 1.458$ , нанесенного на поверхность идеального металла. Область значений  $n^* > 1$  соответствует обычным модам, испытывающим полное внутреннее отражение на обеих границах волновода, а область  $n^* < 1$  – модам утечки, которые на границе раздела диэлектрик – воздух испытывают только частичное отражение. Именно эти моды обеспечивают высокую эффективность работы решетки.

Моды утечки легко могут быть обнаружены в плоском слое поглощающего диэлектрика при измерении коэффициента отражения света от структуры. На рис.2 показана зависимость коэффициента отражения  $R$  света, падающего на структуру под углом  $\theta_{in} = 60^\circ$ , от толщины слоя (угол отсчитывается от нормали к слою). Минимумы коэффициента отражения соответствуют возбуж-

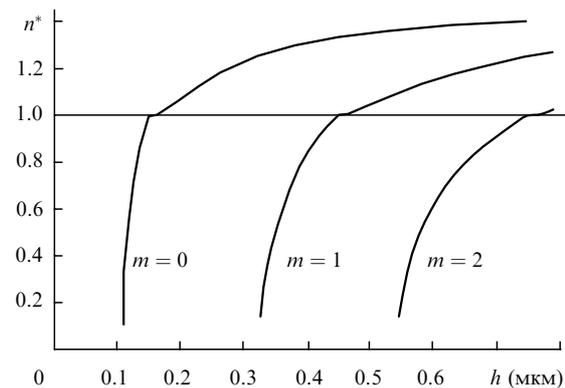


Рис.1. Зависимости эффективного показателя преломления мод утечки от толщины диэлектрического слоя с  $n_f = 1.458$ , нанесенного на идеальный металл при ТЕ-поляризации света с  $\lambda = 0.63$  мкм.

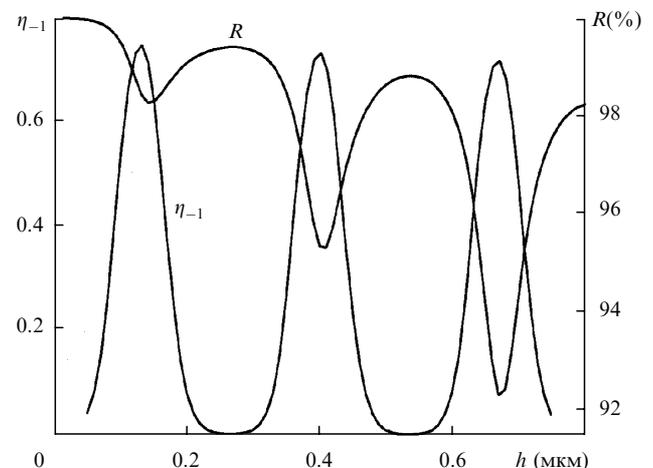


Рис.2. Отражение света  $R$  от поверхности плоской волноводной структуры металл – диэлектрик с модами утечки ( $n_f = 1.458 + i \cdot 0.001$ ) и коэффициент автоколлимационного отражения света  $\eta_{-1}$  от гофрированного волновода металл – диэлектрик с модами утечки ( $n_f = 1.458$ , глубина гофра  $2\sigma = 100$  нм) как функции толщины диэлектрической пленки ( $\lambda = 0.63$  мкм).

\*Институт общей физики РАН, Россия, 117769 Москва, ул. Вавилова, 38

\*\*Université Jean Monnet, 23, rue du dr. Paul Michelon, 42023 St. Etienne, Cedex 2, France

дению мод утечки и резонансному поглощению света в структуре. Аналогичные пики поглощения имеют место в случае прозрачного диэлектрика и реального металла.

Резонансное поглощение является существенным недостатком металлodieлектрической решетки, поэтому в настоящей работе рассмотрены многослойные диэлектрические решетки, обладающие большой лучевой стойкостью и высокой дифракционной эффективностью. В отличие от металлodieлектрической решетки, многослойная диэлектрическая решетка может быть реализована несколькими способами. Выбор наиболее приемлемого варианта представляет собой сложную задачу. В настоящей работе показано, что волноводный подход к анализу работы многослойной решеточной структуры позволяет успешно провести оптимизацию ее параметров.

### 1. Решеточная структура с плоским зеркалом

В работе [2] было установлено, что гофрированная непоглощающая диэлектрическая пленка на металле с периодом гофра  $A = \lambda/2 \sin \theta$  имеет коэффициент автоколлимационного отражения света ТЕ-поляризации, равный дифракционной эффективности в  $-1$ -м порядке:

$$\eta_{\text{авт}} = \frac{(k\sigma)^2 (n_f^2 - 1) (1 - n^{*2}) \cos^4(A/2)}{[n_f^2 - n^{*2} - (n_f^2 - 1) \cos^2(A/2)]^2}, \quad (2)$$

где  $A = 2kh(n_f^2 - n^{*2})^{1/2} - \pi$ ;  $2\sigma$  – глубина синусоидальной решетки. Зависимость  $\eta_{-1}$  от толщины пленки представлена на рис.2. Максимальные значения эффективности решетки достигаются при выполнении условия  $A = 2m\pi$ , что совпадает с уравнением (1) и означает, что максимум автоколлимационного отражения достигается при возбуждении мод утечки в диэлектрическом слое гофрированной структуры. Возбуждение этих мод падающим пучком света обеспечивает взаимодействие волноводной моды с решеткой по всей длине ее пробега вдоль решетки и повышает эффективность дифракционного процесса. Длина пробега волноводной моды, или, другими словами, добротность моды, определяется коэффициентом отражения света на границе диэлектрического слоя с воздухом.

Увеличение коэффициента френелевского отражения увеличивает добротность моды, что при фиксированной глубине гофра увеличивает дифракционную эффективность решетки. Так, например, увеличение угла падения света на решетку  $\theta_{\text{ин}}$  до  $89^\circ$  позволяет в рассмотренной выше структуре получить 100%-ное автоколлимационное отражение света при глубине решетки  $2\sigma = 6$  нм, что в 63 раза меньше необходимой для этого глубины решетки в слое  $\text{SiO}_2$  при  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$  (рис.3). Аналогичного результата можно достигнуть при сохранении угла падения света  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$  путем увеличения показателя преломления диэлектрического слоя. Очевидно, что и в этом случае увеличение добротности моды происходит благодаря увеличению коэффициента отражения света на границе слоя с воздухом.

До сих пор в нашем рассмотрении металлическая подложка полагалась идеальной, т. е. не вносящей диссипативных потерь. Однако на практике реальная металлическая подложка уменьшает добротность волноводной моды и при фиксированной глубине гофра понижает дифракционную эффективность структуры; особенно за-

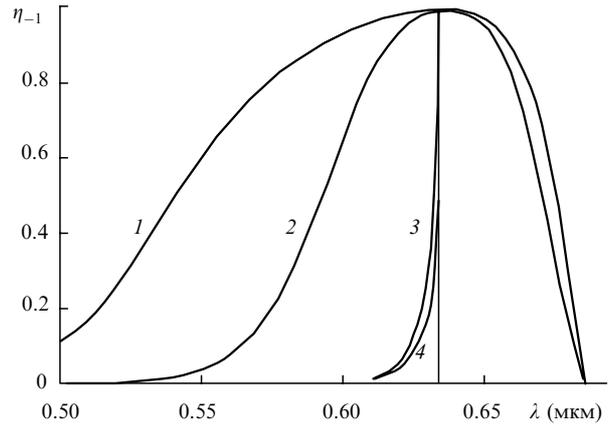


Рис.3. Спектральные зависимости дифракционного отражения света ( $\lambda_{\text{авт}} = 0.63$  мкм) от поверхностей гофрированных волноводов, состоящих из слоя  $\text{SiO}_2$  на металле,  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$ ,  $A = 365$  нм,  $2\sigma = 380$  нм (1); слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  на металле,  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$ ,  $2\sigma = 60$  нм (2); слоя  $\text{SiO}_2$  на идеальном металле,  $\theta_{\text{ин}} = 89^\circ$ ,  $A = 315$  нм,  $2\sigma = 6$  нм (3); слоя  $\text{SiO}_2$  на серебре ( $n = 0.072 + i \cdot 3.465$ ),  $\theta_{\text{ин}} = 89^\circ$ ,  $2\sigma = 6$  нм (4). Толщина волновода определялась для моды с  $m = 1$ .

метным уменьшение  $\eta_{\text{авт}}$  становится при скользящем падении света на решетку. На рис.3 для примера показаны спектральные зависимости коэффициента автоколлимационного отражения для гофрированной структуры с подложкой из идеального или реального металла (серебро) при  $\theta_{\text{ин}} = 89^\circ$ . Существенное (в 2 раза) уменьшение дифракционной эффективности структуры обусловлено поглощением света в серебре. Последнее, по сути дела, носит резонансный характер вследствие концентрации света внутри волновода при возбуждении его падающим пучком света.

Переход от металлического зеркала в рассматриваемой структуре к многослойному диэлектрическому зеркалу – это естественный путь повышения лучевой стойкости гофрированной структуры. На рис. 4 показаны спектральные зависимости коэффициента автоколлимационного отражения для структур с металлическим и диэлектрическим зеркалами, а также коэффициента отражения самого диэлектрического зеркала. Зависимость  $\eta_{-1}(\lambda)$

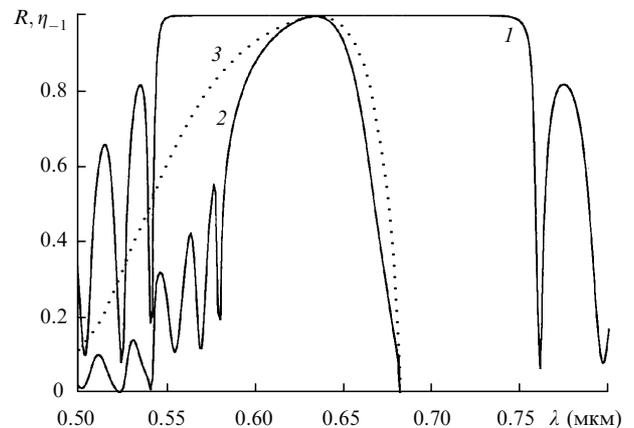


Рис.4. Спектральные зависимости френелевского и дифракционного отражения света ( $\lambda_{\text{авт}} = 0.63$  мкм) от поверхностей различных структур, состоящих из плоского диэлектрического зеркала (15 пар слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  на стеклянной подложке),  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$  (1); гофрированного слоя  $\text{SiO}_2$  ( $h = 0.33$  мкм) на плоском многослойном зеркале (14 пар слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  плюс четвертьволновый слой  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ),  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$ ,  $A = 365$  нм,  $2\sigma = 380$  нм (2); слоя  $\text{SiO}_2$  ( $h = 0.33$  мкм) на металле,  $\theta_{\text{ин}} = 60^\circ$ ,  $A = 365$  нм,  $2\sigma = 380$  нм (3).

получена для гофрированной структуры с оптимальной глубиной гофра (слой SiO<sub>2</sub> на зеркале), т. е. с такой глубиной решетки, при которой коэффициент автоколлимационного отражения достигает единицы.

Обратим внимание на то, что оптимальная глубина гофра диэлектрической структуры не отличается от оптимальной глубины гофра металлодиэлектрической структуры, чего нельзя сказать о спектральной ширине полосы отражения. Это связано с распределенным характером отражения света на диэлектрическом зеркале, т. е. по сути с распределением поля моды утечки в многослойной волноводной структуре, которое сильно отличается от распределения поля моды в металлодиэлектрической структуре.

В дальнейшем снова для простоты будем использовать идеальное металлическое зеркало. Как уже отмечалось, повышение добротности мод в структуре воздух – диэлектрический слой – металлическая подложка позволяет уменьшить оптимальную глубину гофра. Если показатель преломления гофрированного диэлектрического слоя невелик, например это слой SiO<sub>2</sub> с  $n_f = 1.46$ , то коэффициент отражения света на границе диэлектрического слоя с воздухом можно увеличить путем нанесения на него четвертьволнового диэлектрического слоя с  $n_b > n_f$ , например слоя Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ( $n_b = 2.1$ ) толщиной

$$h_b = \frac{\lambda}{4n_b \sin \theta_b}, \tag{3}$$

где  $\theta_b$  – угол между направлением распространения света в этом слое и нормалью. Толщина волноводного слоя (SiO<sub>2</sub>) при этом выбирается из условия

$$2kh(n_f^2 - n^{*2})^{1/2} = 2m\pi, \tag{4}$$

которое представляет собой дисперсионное соотношение для мод утечки диэлектрического слоя на металле, покрытого сверху средой с  $n_b > n_f$ .

Расчеты показывают, что в этом случае оптимальная глубина решетки  $2\sigma_{opt} = 70$  нм, что в 5.5 раз меньше, чем в случае структуры без дополнительного слоя. Аналогичный эффект можно получить и для диэлектрической структуры, состоящей из слоя SiO<sub>2</sub> на многослойном диэлектрическом зеркале, если поверх гофрированного слоя нанести четвертьволновой слой Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Результаты

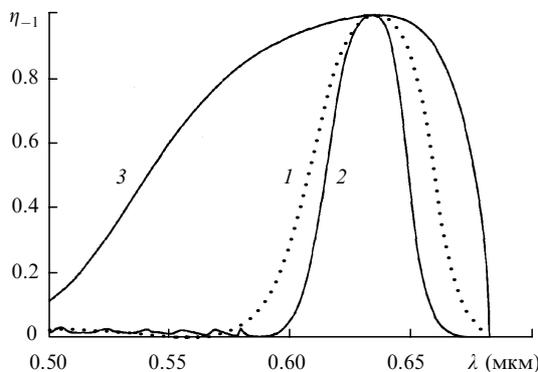


Рис.5. Спектральные зависимости дифракционного отражения света ( $\lambda_{avt} = 0.63$  мкм) от поверхностей различных гофрированных структур с дополнительным четвертьволновым слоем Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, состоящих из слоя SiO<sub>2</sub> ( $h = 0.265$  мкм) на металле,  $\theta_{in} = 60^\circ$ ,  $A = 365$  нм,  $2\sigma = 70$  нм (1); слоя SiO<sub>2</sub> ( $h = 0.265$  мкм) на диэлектрическом зеркале (14 пар слоев Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub> плюс четвертьволновый слой Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),  $\theta_{in} = 60^\circ$ ,  $A = 365$  нм,  $2\sigma = 70$  нм (2); слоя SiO<sub>2</sub> ( $h = 0.33$  мкм) на металле без дополнительного слоя,  $2\sigma = 380$  нм (3).

расчетов спектральной зависимости  $\eta_{-1}$  для указанных случаев представлены на рис.5. (Отметим, что результаты, показанные на рис.3, 4, 5 и 8, получены с помощью компьютерной программы, в основе которой лежит метод «источников» [3].) Эффективность работы решеточной структуры в первую очередь определяется возбужденными в ней модами утечки. Сохраняется ли эта ситуация при переходе к двухслойной волноводной структуре?

Дисперсионное уравнение для волновода, состоящего из двух диэлектрических слоев на металлической подложке, в случае ТЕ-волн имеет вид

$$\tan [kh_1(n_1^2 - n^{*2})^{1/2}] \tan [kh_2(n_2^2 - n^{*2})^{1/2}] = \left( \frac{n_1^2 - n^{*2}}{n_2^2 - n^{*2}} \right)^{1/2}, \tag{5}$$

где  $h_1$  – толщина первого слоя ( $n_1$ ), лежащего на металле;  $h_2$  – толщина второго слоя ( $n_2$ ), лежащего на первом и граничащего с воздухом.

На рис.6 показаны кривые, связывающие значения  $h_1$  и  $h_2$ , которые удовлетворяют дисперсионному уравнению (5) при некотором заданном  $n^*$  для мод утечки с  $m = 0$  и 1. В окрестности точки А дисперсионное уравнение (5) может быть представлено в виде

$$h_1 = \frac{\lambda}{4} \frac{(n_1^2 - n^{*2})^{1/2} + 2(n_2^2 - n^{*2})^{1/2}}{(n_1^2 - n^{*2})^{1/2}(n_2^2 - n^{*2})^{1/2}} - h_2. \tag{6}$$

Отметим, что при изменении положения слоев решеточная структура сохраняет предельно высокую дифракционную эффективность:  $\eta_{avt} = 100\%$  при достаточно малой глубине решетки.

Оптимальную глубину решетки  $2\sigma_{opt}$  можно еще больше уменьшить, нанося на поверхность волноводной структуры чередующиеся по показателю преломления пары четвертьволновых слоев. Эти добавленные слои уменьшают коэффициент прохождения света через границу волновод – воздух, т.е. увеличивают добротность моды и сохраняют прежний эффективный показатель преломления волноводной моды утечки.

## 2. Полностью гофрированная структура

При дальнейшем увеличении числа пар чередующихся по показателю преломления дополнительных четвертьволновых слоев на поверхности волноводной стру-

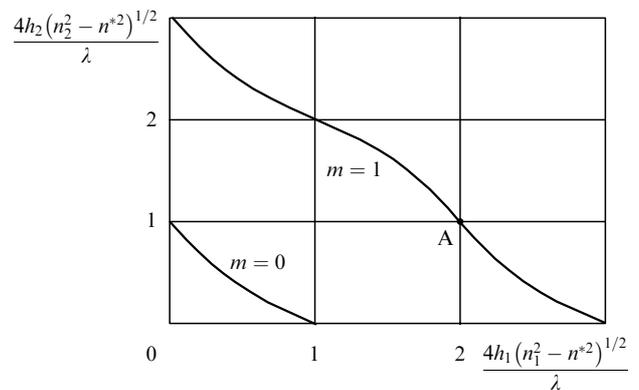


Рис.6. Области значений параметров двухслойного волновода с модами утечки, образованного слоями SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, на металлической подложке.

ктур возникает новая решеточная структура. Она представляет собой диэлектрическое многослойное зеркало, все слои которого имеют одинаковые период, глубину и фазу гофра. Такая структура может быть получена нанесением многослойного диэлектрического зеркала на гофрированную подложку. В случае плоского многослойного диэлектрического зеркала с ростом числа  $N$  пар четвертьволновых слоев ( $\text{SiO}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5$ ) влияние подложки на коэффициент отражения зеркала существенно снижается и при  $N \approx 15$  практически исчезает. И это вполне понятно, поскольку поле падающей и отраженной волны в структуре экспоненциально убывает в глубь зеркала.

С волноводной точки зрения рассматриваемая многослойная структура по сути является волноводом с вытекающей модой, эффективный показатель преломления которой определяется углом отражения света:  $n^* = \sin \theta_{\text{in}}$ . Убедительно иллюстрирует это утверждение рис. 1 из работы [4], на котором показано изменение коэффициента отражения света, падающего под углом  $\theta_{\text{in}}$  на поверхность структуры, в зависимости от нормированной толщины слоя. Этот рисунок аналогичен рис.2 настоящей статьи.

Гофрировка рассматриваемой структуры с периодом  $\Lambda = \lambda/2n^*$  позволяет получить стойкую к мощному излучению решеточную структуру, дифракционная эффективность  $\eta_{-1}$  которой в режиме Литтрова может достигать высоких значений при достаточно малой глубине гофра [4]. При этом влияние материала подложки на коэффициент автоколлимационного отражения света при  $N \approx 15$  несущественно. Более того, на дифракционные характеристики такой структуры не влияет наличие или отсутствие волноводного слоя на подложке. На рис.7 показаны спектральные зависимости  $\eta_{-1}$  при оптимальной глубине гофра (ТЕ-поляризация света) для структур с  $N = 15$  на стеклянной подложке, а также на стеклянной подложке с волноводным слоем. Эти результаты получены с помощью компьютерной программы, в основе которой лежит метод Шандезона [5].

Сравнение спектральной ширины линии автоколлимационного отражения света от гофрированных многослойных структур трех типов, состоящих из одного гоф-

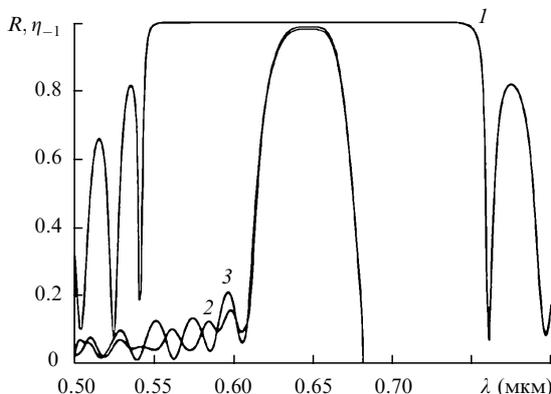


Рис.7. Спектральные зависимости френелевского и дифракционного отражения света ( $\lambda_{\text{авт}} = 0.63$  мкм) от поверхностей диэлектрического зеркала (15 пар слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ ) на плоской стеклянной подложке,  $\theta_{\text{in}} = 60^\circ$  (1); диэлектрического зеркала (15 пар слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ ) на гофрированной стеклянной подложке,  $\theta_{\text{in}} = 60^\circ$ ,  $\Lambda = 365$  нм,  $2\sigma = 190$  нм (2); диэлектрического зеркала на гофрированной подложке с волноводным слоем на гофрированной стеклянной подложке,  $\theta_{\text{in}} = 60^\circ$ ,  $\Lambda = 365$  нм,  $2\sigma = 190$  нм, волновод образован нижним слоем  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $h = 165$  нм (3).

рированного слоя на многослойном зеркале (тип 1), двух гофрированных слоев на многослойном зеркале (тип 2) и многослойного диэлектрического зеркала на гофрированной подложке (тип 3) показывает, что при оптимальных глубинах гофра минимальная ширина линии отражения, а также наименьшая оптимальная глубина гофра достигаются в структуре 2-го типа. Физическая причина выявленных дифракционных свойств структуры кроется в ее распределенном (по всей толщине структуры) волноводном характере и дифракции света в ней.

### 3. Эксперимент. Решетка с дополнительным отражающим слоем

При создании диэлектрической решетки на гофрированной подложке имеет место сглаживание гофра по мере увеличения числа диэлектрических слоев, поэтому получение решетки на поверхности верхнего волноводного слоя представляется нам более предпочтительным, тем более что в этом случае возможна некоторая корректировка параметров структуры. Корректировка в процессе изготовления структуры заставляет параметры двухслойной дифракционной структуры с большим  $\eta_{\text{авт}}$  удовлетворять уравнению (5). Например, если при изготовлении решеточной структуры слой  $\text{SiO}_2$ , образующий волновод, по толщине отличается от проектного, то путем нанесения второго слоя ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), толщина которого определена из условия (5), можно сохранить волноводность структуры на заданной длине волны с заданным  $n^*$ .

Для экспериментальной реализации диэлектрической решетки была использована многослойная структура, состоящая из четырех пар четвертьволновых слоев  $\text{HfO}_2 - \text{SiO}_2$ , одного четвертьволнового слоя  $\text{HfO}_2$  и одного слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 406 нм, нанесенных на кварцевую подложку. Девятислойное зеркало было рассчитано на максимальное отражение ( $R = 95\%$ ) света ТЕ-поляризации с  $\lambda = 1.18$  мкм под углом  $\theta_{\text{in}} = 63^\circ$ . Реализация решетки возможна двумя способами. Первый из них предполагает гофрирование слоя  $\text{SiO}_2$  и последующее покрытие его слоем  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , который тоже будет гофрированным. Второй способ заключается в первоначальном напылении слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и последующем его гофрировании.

Поскольку по нашим расчетам второй способ обеспечивает большую эффективность дифракции в автоколлимационном режиме при меньшей глубине гофра волно-

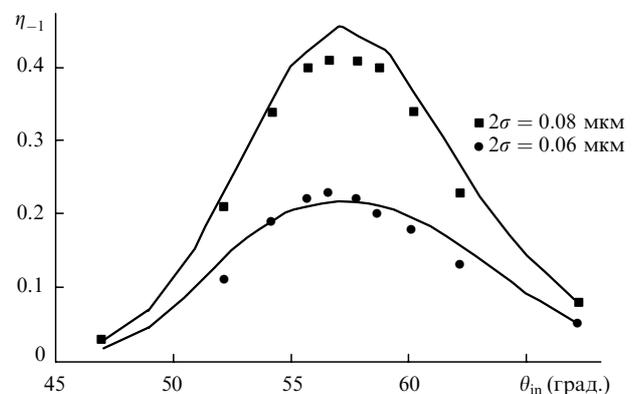


Рис.8. Экспериментальные угловые зависимости эффективности дифракционного отражения света от поверхности двухслойного гофрированного волновода при  $2\sigma = 0.08$  и  $0.06$  мкм. Сплошными линиями показаны расчетные зависимости при толщине слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , равной  $0.24$  мкм.

водного слоя, он и был выбран для реализации волновоодно-решеточной структуры. Напыление слоя на поверхность многослойной диэлектрической структуры производилось на установке магнетронного напыления. Гофрирование поверхности слоя  $Ta_2O_5$  ( $\Lambda = 0.684$  мкм) проводилась стандартными методами: голографическим методом была сделана фоторезистивная маска, а методом ионного травления был осуществлен перенос решетки в слой  $Ta_2O_5$ .

Для измерения угловой зависимости дифракционной эффективности изготовленных решеток использовался лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 1.15$  мкм. На рис.8 представлены результаты измерений для двух решеток различной глубины. Видно удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных зависимостей. Используемая в расчетах толщина пленки  $Ta_2O_5$  была близка к экспериментально измеренной. Максимальный коэффициент автоколлимационного отражения на решетке с большей глубиной гофра ( $2\sigma = 0.08$  мкм) достигается на длине волны излучения  $\lambda = 1.162$  мкм и составляет 56%.

Эта решетка была использована в качестве выходного зеркала в лазере на центрах окраски  $F^{2-}$  в кристалле  $LiF_2$ ; источником накачки лазера служил  $YAG:Nd^{3+}$ -лазер, работающий в режиме модулированной добротности. Стойкость диэлектрической решетки к мощному излучению позволила обеспечить устойчивую работу лазера на центрах окраски при высоких уровнях накачки без использования каких-либо расширителей пучка. Следует отметить, что достижение высокой дифракционной эффективности (100%) диэлектрической решетки при скользких углах падения света на решетку  $\theta_{in} \approx 89^\circ$  позволяет получить в автоколлимационной схеме резонатора

предельно узкий спектр генерации лазера как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы лазера. Детали спектрального исследования излучения лазера с решеткой скользкого падения света будут представлены в нашей следующей публикации.

Таким образом, анализ автоколлимационного отражения света в многослойных гофрированных структурах показал, что высокий коэффициент отражения реализуется только при возбуждении в этих структурах мод утечки, а малая глубина оптимального гофра достигается в структурах с высокой добротностью этих мод.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 99-02-82000 и № 00-02-17442), а также программы «Интеграция» (проект № А0103/99).

1. Свахин А.С., Сычугов В.А., Тихомиров А.Е. *ЖТФ*, **61**, 124 (1991).
2. Салахутдинов И.Ф., Сычугов В.А., Парье О. *Квантовая электроника*, **25**, 1009 (1998).
3. Tishchenko A.V. *Pure and Appl.Optics*, № 7, 1425 (1998).
4. Lifeng Li, HirshJ. *Optics Letts*, **20**, 1349 (1995).
5. Chandezon J., Dupuis M.T., Gornet G., Maystre D. *J.Opt.Soc. Amer.*, **72**, 839 (1982).

**V.A.Sychugov, B.A.Usievich, K.E.Zinov'ev, O.Parriaux. Autocollimating diffraction gratings based on waveguides with leakage modes.**

It is shown that the leakage modes of multilayer corrugated dielectric and metal-dielectric structures are extremely important for the achievement of high efficiency of such structures as diffraction gratings. Three types of grating structures are considered: a corrugated waveguide layer on a flat multilayer dielectric mirror (type 1); a multilayer dielectric mirror on a corrugated substrate (i.e., a complete corrugated structure) (type 2); a structure of the intermediate type (type 3). The performance characteristics of these structures in the Littrow arrangement are compared. A grating based on a two-layer waveguide with leakage modes is manufactured.