

ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ

Субволновые дифракционные решетки видимого диапазона

Н.И.Петров, В.А.Данилов, В.В.Попов, Б.А.Усиевич

Приведены результаты компьютерных расчетов и измерений субволновых дифракционных решеток в видимом диапазоне спектра излучения. Исследовано влияние различных параметров решетки (скважность, форма и глубина микро-рельефа, материал, угол падения, длина волны и поляризация излучения) на дифракционную эффективность. Отличительной особенностью рассматриваемых субволновых решеток является то, что вся дифрагированная энергия пучка перераспределяется в нулевой и -1 -й порядки. Установлено, что нулевой порядок может быть подавлен выбором глубины и формы рельефа решетки. Изготовлены субволновые решетки с периодом 400 нм и проведены измерения с использованием лазеров и лазерных диодов, излучающих в видимом диапазоне длин волн. Высокая эффективность дифракции в -1 -й порядок (более 70%) наблюдается с увеличением глубины рельефа решетки (при глубине $h = 80$ нм) в широком спектральном диапазоне (450–650 нм). Экспериментально продемонстрировано, что при определенных условиях возникает эффект плазмонного резонанса, при котором имеет место полное поглощение падающего излучения. Рассматриваемые оптические элементы могут использоваться в системах обработки изображения, проекционных дисплеях, при разработке различных сенсоров и т. д.

Ключевые слова: субволновая решетка, дифракционная эффективность, плазмонный резонанс.

1. Введение

Интерес к субволновым решеткам (период решетки меньше длины волны излучения) растет в связи с их перспективными применениями в высокоэффективных фильтрах прохождения и отражения излучения [1], в оптоэлектронных устройствах с использованием поверхностных плазмонов [2–5], спектрально-селективных внешних оптических зеркалах для лазеров (VCSELs) [6–8]. В работе [9] субволновые решетки предложены для реализации оптических задержек по времени без использования волноводов различной длины. Субволновые решетки были также предложены для фокусировки света как в дальней [10], так и в ближней [11] зоне.

Субволновые диэлектрические решетки являются альтернативой распределенным брэгговским многослойным диэлектрическим отражателям в широкополосных высокоотражающих устройствах для фильтрации излучения. Такие структуры являются компактными, дешевыми в изготовлении и обеспечивают новые возможности для контроля поляризационных свойств излучения. Дифракционные решетки также находят применение в устройствах для расщепления пучка света в цветовые составляющие [12–18]. В работе [19] рассмотрен новый тип тонкопленочного устройства для разделения цветов, основанного

на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения. Такие оптические элементы могут использоваться для обработки изображения в изображающих системах, проекционных дисплеях и т. д. В [20] были предложены и продемонстрированы субволновые решетки для совмещения красного, зеленого и синего световых пучков в один общий пучок. Показано, что такие решетки обладают высокой эффективностью и позволяют существенно уменьшить размеры проекционных устройств, используемых в мобильных телефонах и т. д. На эффективность работы этих устройств влияет ряд факторов, зависящих от свойств материалов и структурных параметров решетки (например, периода, скважности и глубины микро-рельефа).

Практический интерес представляют также плазмонные поглощающие металлodieлектрические структуры для частотно-селективных и широкополосных поглотителей. Такие структуры для поглощения излучения в далекой ИК области рассматривались в [21].

В настоящей работе показано, что эффект полного поглощения можно наблюдать в металлической субволновой решетке и для излучения в видимом диапазоне спектра. В работе приведены результаты компьютерных расчетов и измерений субволновых дифракционных решеток.

2. Результаты расчетов

Теория дифракции излучения на решетках в настоящее время разработана достаточно полно (см., напр., [22]). Поскольку скалярная теория дифракции не может быть применена для субволновых решеток [23], то в этом случае для расчетов используется электромагнитная теория [24] на основе С-метода [25–27], применимость которого определяется в основном отношением глубины микро-рельефа решетки к ее периоду. С-метод позволяет полу-

Н.И.Петров, В.А.Данилов. Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия, 117342 Москва, ул. Бульварова, 15; e-mail: petrovni@mail.ru

В.В.Попов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Б.А.Усиевич. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г., после доработки – 1 февраля 2018 г.

чить надежные результаты, когда глубина решетки меньше ее периода [24]. Модовый подход (RCWA) для металлических решеток сталкивается с проблемой сходимости в случае р-поляризации излучения.

2.1. Дифракционная эффективность

На дифракционную эффективность решетки влияют ряд факторов: скважность, форма и глубина микрорельефа, материал решетки, угол падения, длина волны и поляризация излучения. На рис.1 представлены распределения интенсивности по 0-му и -1-му порядкам дифракции в зависимости от длины волны излучения при разных глубинах микрорельефа для падающего излучения с s - ($a, \text{в}$) и p -поляризацией ($б, з$) соответственно. Угол падения излучения на решетку равен 60° . Рассматривается профиль штрихов решетки в форме равнобедренного треугольника. Высота треугольника (глубина микрорельефа) изменяется от 120 до 170 нм с шагом 10 нм. Период решетки составляет 400 нм; материал – алюминий. Видно, что дифракционная эффективность C_{-1} растет с увеличением глубины микрорельефа решетки. Отметим, что потери на поглощение в материале решетки составляют менее 15% в видимом диапазоне длин волн 450–700 нм.

Дифракционная эффективность растет с увеличением глубины решетки как для p -, так и для s -поляризации света; причем в отличие от s -поляризации, в случае p -поляризации основная часть падающего излучения переходит

в -1-й порядок дифракции. Это свойство необходимо учитывать при разработке различных устройств с использованием субволновых решеток.

На рис.2 представлены дифракционные эффективности в разных порядках спектра алюминиевой синусоидальной решетки с периодом $\Lambda = 600$ нм в зависимости от длины волны излучения с p -поляризацией при различных значениях глубины микрорельефа. Угол падения излучения с p -поляризацией равен 5° . Видно, что в данном случае (в отличие от субволновой решетки) значительная доля энергии дифрагирует в +1-й порядок (рис.2,в). Из расчетов следует, что при определенных условиях (длина волны излучения, угол падения) происходит почти 100%-ное поглощение падающего излучения. Так, при длине волны излучения $\lambda = 555$ нм и глубине микрорельефа $h = 50$ нм практически вся энергия излучения поглощается решеткой (рис.2,з). Это свойство может быть использовано при создании неотражающих металлических поверхностей для различных применений.

Аналогичные зависимости получены для никелевой решетки. Отметим, что потери на поглощение в случае никелевой решетки значительно больше, чем для алюминиевой. Кроме того, большая часть падающей энергии в никелевой решетке уходит в нулевой порядок.

На рис.3 приведены дифракционные эффективности в зависимости от длины волны излучения для решеток из различных материалов. Угол падения излучения с p -поляризацией на решетку равен 60° . Рассматривается про-

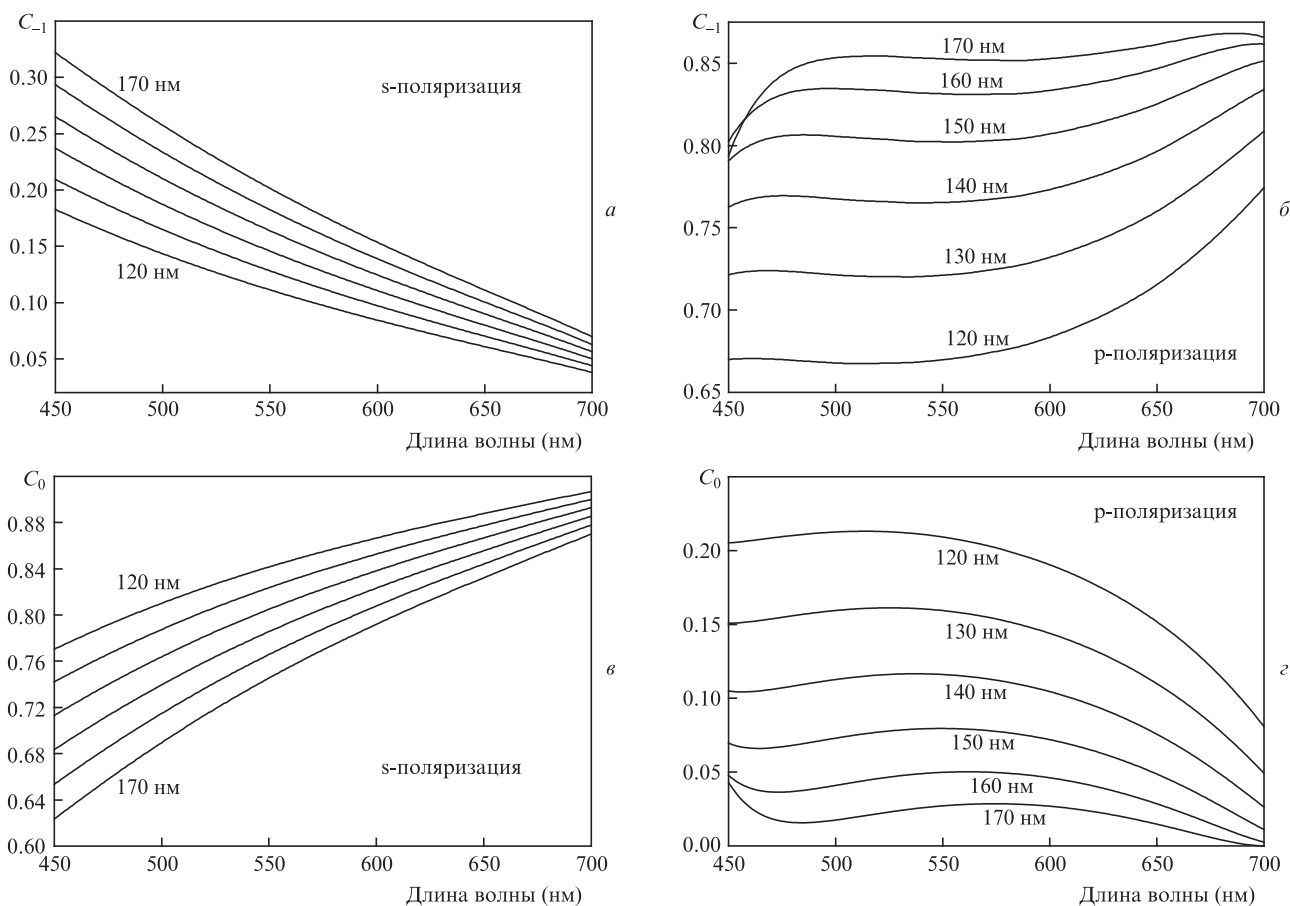


Рис.1. Дифракционные эффективности C_0 и C_{-1} в зависимости от длины волны излучения с s -поляризацией ($a, \text{в}$) и p -поляризацией ($б, з$) для различных глубин микрорельефа алюминиевой решетки с профилем в форме равнобедренного треугольника. Угол падения излучения $\theta_i = 60^\circ$, период решетки $\Lambda = 400$ нм.

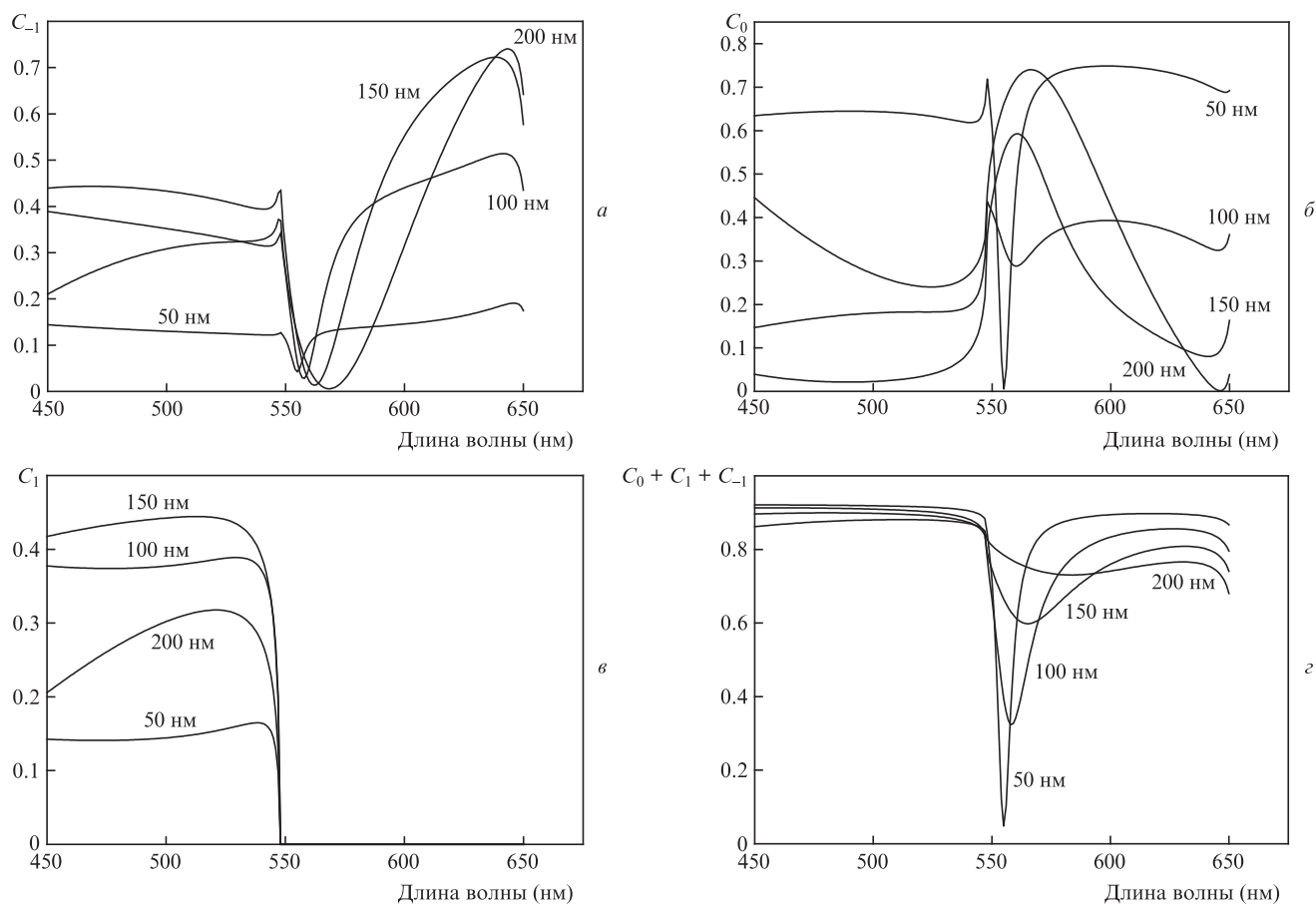


Рис.2. Дифракционные эффективности в разных порядках для алюминиевой синусоидальной решетки с периодом $\Lambda = 600$ нм в зависимости от длины волны излучения с р-поляризацией при различных значениях глубины микрорельефа.

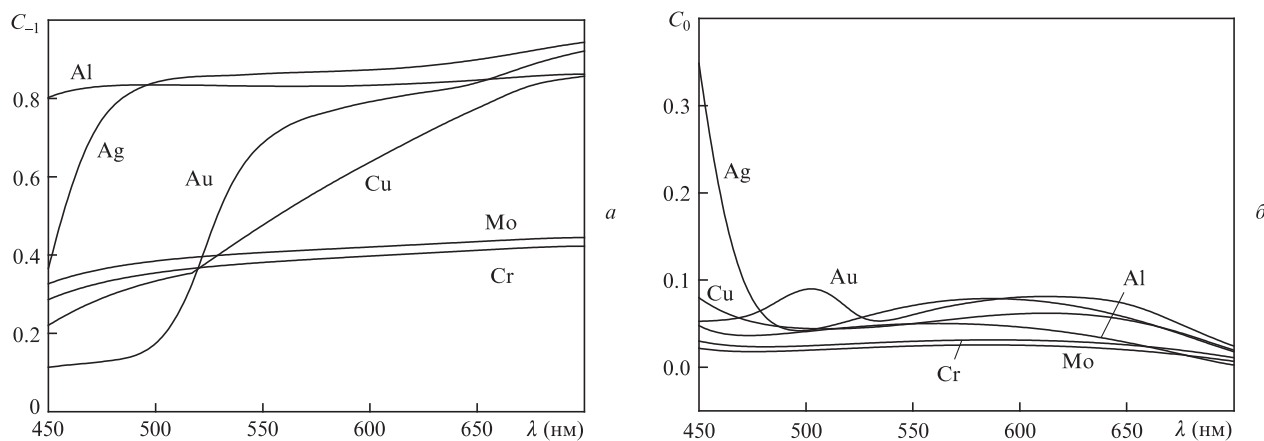


Рис.3. Дифракционные эффективности решеток из различных материалов в зависимости от длины волны излучения с р-поляризацией.

филь решетки в форме равнобедренного треугольника, высота которого (глубина микрорельефа) составляет 160 нм. Период решетки $\Lambda = 400$ нм. Материалы – алюминий, хром, серебро, золото, медь, молибден. Материальные константы веществ были взяты из работ [28–30]. Как следует из расчетов, изменение дифракционной эффективности сильнее для длин волн в голубой области спектра. Видно, что наибольшие дифракционные эффективности достигаются при использовании решеток из серебра и алюминия.

Исследовано также влияние скважности решетки на дифракционную эффективность. Скважность определя-

ется как величина, обратная коэффициенту заполнения. Коэффициент заполнения F задает часть периода решетки, заполненную материалом решетки. Так, $F = 0.5$ означает, что 50% поперечного сечения внутри периода решетки заполнено металлом, а остальная часть – воздухом. Были рассмотрены решетки с синусоидальными, треугольными и трапецидальными профилями. На рис.4 представлены рассчитанные зависимости дифракционной эффективности C_{-1} от длины волны излучения для синусоидальной и трапецидальной решеток из алюминия. При вычислениях использовались следующие параметры решетки и падающего излучения: период решетки $\Lambda = 400$ нм,

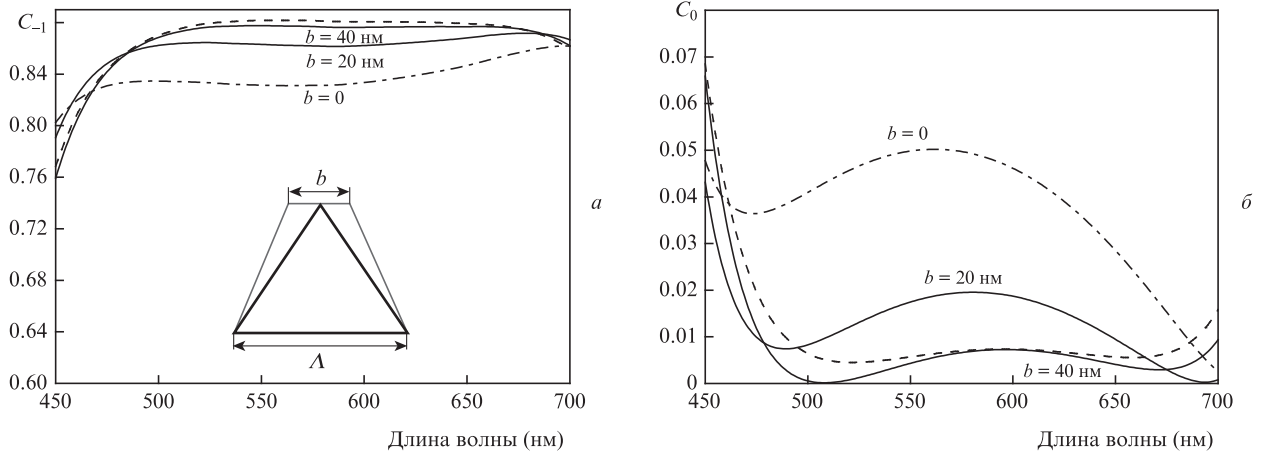


Рис.4. Дифракционные эффективности в зависимости от длины волны излучения с р-поляризацией для алюминиевых решеток с синусоидальным (штриховые кривые), треугольным (штрих-пунктирные кривые) и трапециевидным (сплошные кривые) профилями; $\theta_i = 60^\circ$, $\Lambda = 400$ нм, $h = 160$ нм. На вставке показан профиль решетки.

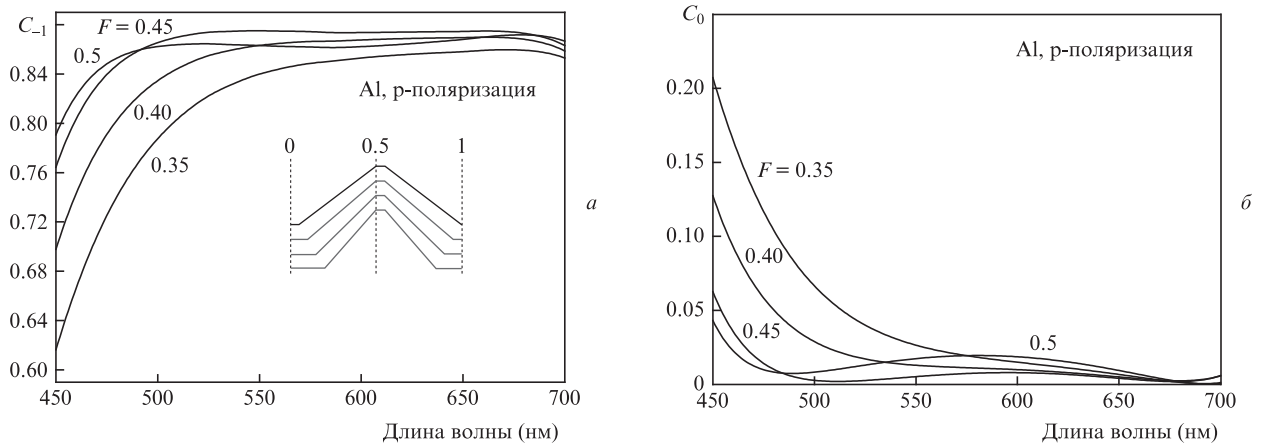


Рис.5. Распределения интенсивности по порядкам дифракции в зависимости от длины волны излучения при разных коэффициентах заполнения F трапециевидной решетки ($h = 160$ нм, $\Lambda = 400$ нм; материал – алюминий). На вставке – профили решетки при различных F .

угол падения $\theta_i = 60^\circ$, высота решетки $h = 160$ нм, р-поляризация. Видно, что эффективность дифракции выше для синусоидальной решетки. Найдено, что, в отличие от случая $\Lambda > \lambda$, дифракционные эффективности субволновых решеток с различными профилями близки между собой.

На рис. 5 приведены распределения интенсивности по порядкам дифракции в зависимости от длины волны излучения при разных значениях коэффициента заполнения F трапециевидной решетки из алюминия. Угол падения на решетку излучения с р-поляризацией составляет 60° , глубина микрорельефа – 160 нм, период решетки – 400 нм. Как следует из расчетов, при уменьшении F в случае трапециевидной решетки возможно увеличение дифракционной эффективности для зеленой и красной областей спектра излучения, однако при этом заметно падает эффективность для синей области. Видно, что влияние формы профиля решетки гораздо сильнее для голубого излучения.

Рассмотрим теперь отражательную дифракционную решетку для объединения красного (R), зеленого (G) и голубого (B) лазерных пучков в один общий пучок (рис.6). Углы падения пучков света могут быть определены из уравнения для дифракционных решеток

$$\sin \theta_i + \sin \theta_w = \frac{m \lambda_i}{\Lambda}, \tag{1}$$

где θ_i – углы падения для красного, зеленого и голубого пучков света ($i = R, G, B$); θ_w – угол отражения совмещенного светового пучка; λ_i – длина волны красного, зеленого и голубого пучков света; $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок дифракции.

Из уравнения (1) имеем следующее выражение:

$$\theta_i = \arcsin \left(\frac{m \lambda_i}{\Lambda} - \sin \theta_w \right). \tag{2}$$

Для объединения пучков различного цвета эффективнее использовать -1 -й ($m = -1$) дифракционный порядок, чтобы избежать перемешивания отраженного белого пучка

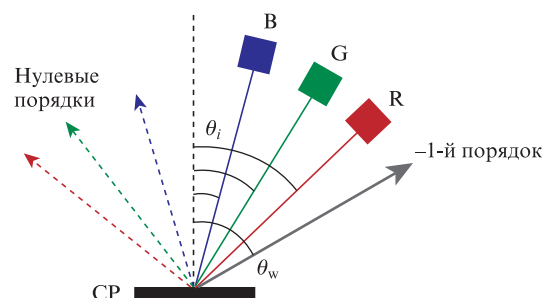


Рис.6. Субволновая отражательная решетка (CP), объединяющая пучки излучения красного (R), зеленого (G) и синего (B) лазеров.

ка света с нулевыми дифракционными порядками падающих лазерных пучков различных цветов:

$$\theta_i = \arcsin\left(-\frac{\lambda_i}{\Lambda} - \sin \theta_w\right). \quad (3)$$

Из (3) следует, что при углах падения $\theta_i = -49.4^\circ, -27.6^\circ$ и -15° (для красного, зеленого и голубого пучков соответственно) угол дифрагированного в -1 -й порядок пучка (θ_w)

будет составлять -60° для периода решетки $\Lambda = 400$ нм. Отметим, что в этом случае $+1$ -й порядок в воздухе отсутствует и, соответственно, в него не уходит часть мощности, что положительно сказывается на дифракционной эффективности в рабочем -1 -м порядке. Для алюминиевой решетки с глубиной микрорельефа 160 нм значения эффективности в -1 -м порядке составляют 80%–85% для падающего излучения в интервале длин волн 450–650 нм (рис.7).

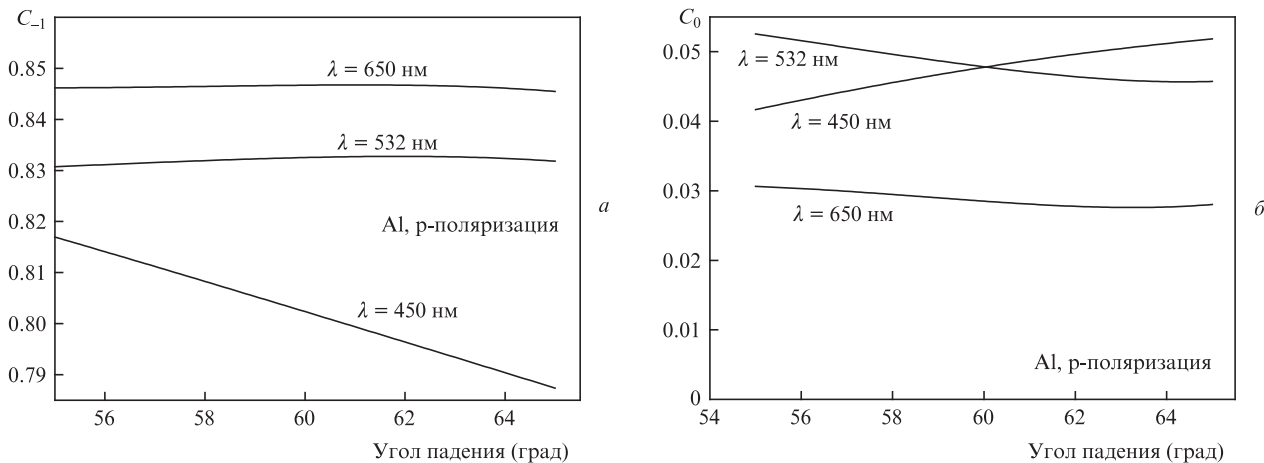


Рис.7. Дифракционные эффективности в зависимости от угла падения излучения с р-поляризацией на алюминиевую решетку с профилем рельефа в форме равнобедренного треугольника ($h = 160$ нм, $\Lambda = 400$ нм) для длин волны излучения 450, 532 и 650 нм.

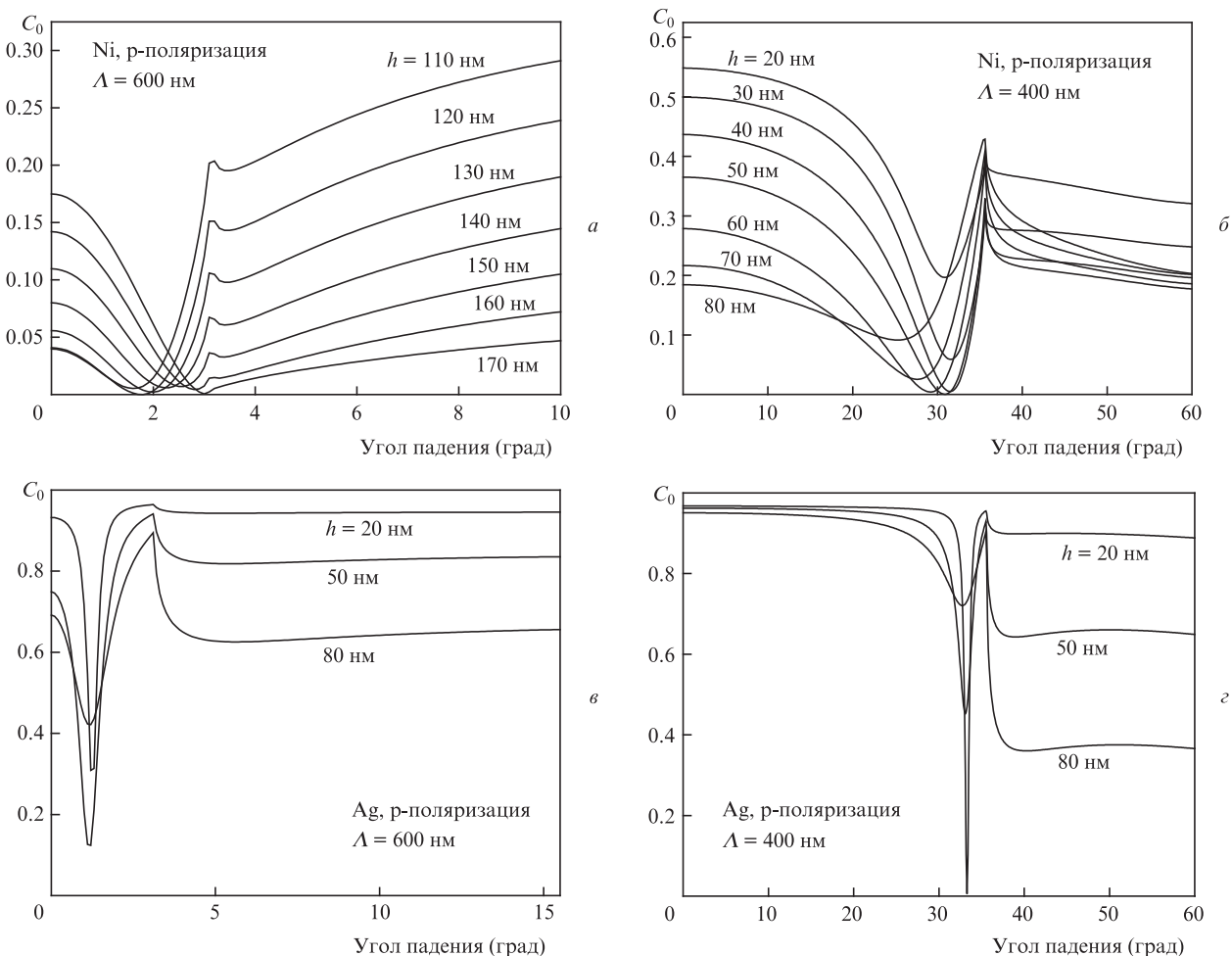


Рис.8. Дифракционные эффективности в нулевом порядке C_0 в зависимости от угла падения для разных глубин h микрорельефа решеток из никеля (a, b) и серебра (v, z) при длине волны излучения 641 нм и периоде $\Lambda = 600$ (a, v) и 400 нм (b, z).

2.2. Поверхностные плазмоны

Поверхностные плазмоны возбуждаются светом с помощью решетки [31]. Возбуждение поверхностных плазмонов при неколлинеарном рассеянии на металлической дифракционной решетке исследовалось в [3]. Установлено [4], что резонансные особенности в спектральных угловых зависимостях пропускания нанорешеток обусловлены возбуждением поверхностных плазмонов металл–воздух и металл–диэлектрик.

Если постоянная решетки равна Λ , то волновой вектор света приобретает добавку $2\pi/\Lambda$, и дисперсионное соотношение для поверхностных плазмонов должно учитывать компоненту волнового вектора, параллельную поверхности. Для угла падения θ_i условие резонанса принимает вид

$$\frac{\omega}{c} \sin \theta_0 + \frac{2m\pi}{\Lambda} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 1}}, \quad (4)$$

где ϵ_r – действительная часть диэлектрической постоянной материала решетки; ω и c – частота и скорость света.

Отметим, что в уравнение (4) не входит глубина микрорельефа, и для глубоких решеток оно может рассматриваться только как оценочное. Однако полученные из этого уравнения значения резонансных углов находятся в хорошем согласии с точными вычислениями. Используя (4), можно определить значения углов падения пучка излучения на решетку, при которых возникает плазмон-

Табл.1. Углы падения, отвечающие условию появления плазмонного резонанса ($\Lambda = 400$ нм) для различных металлов.

λ (нм)	Угол падения θ_0 (град)		
	Al	Ni	Ag
641	36.4	33.4	34.8
532	18.5	14.5	16.1
450	6.2	0.57	1.9

ный резонанс. В табл.1 приведены значения углов падения красного, зеленого и голубого пучков для решеток из Al, Ni и Ag.

На рис.8 представлены дифракционные эффективности в разных порядках для никелевой (а, б) и серебряной (в, г) синусоидальных решеток с периодами $\Lambda = 600$ и 400 нм в зависимости от угла падения излучения с р-поляризацией с длиной волны $\lambda = 641$ нм при различных глубинах микрорельефа h . При определенном угле падения наблюдается эффект плазмонного резонанса. Видно, что при глубине рельефа $h = 80$ нм и угле падения $\theta_i = 33^\circ$ практически 100% падающей энергии поглощается решеткой из серебра (рис.8,г). Для никелевой решетки полное поглощение падающего излучения достигается при $h = 50$ нм и $\theta_i = 31^\circ$ (рис.8,б).

2.3. Дифракция в воде и в воздухе

Для разработки сенсоров представляет интерес исследование дифракции в различных средах. На рис.9 приве-

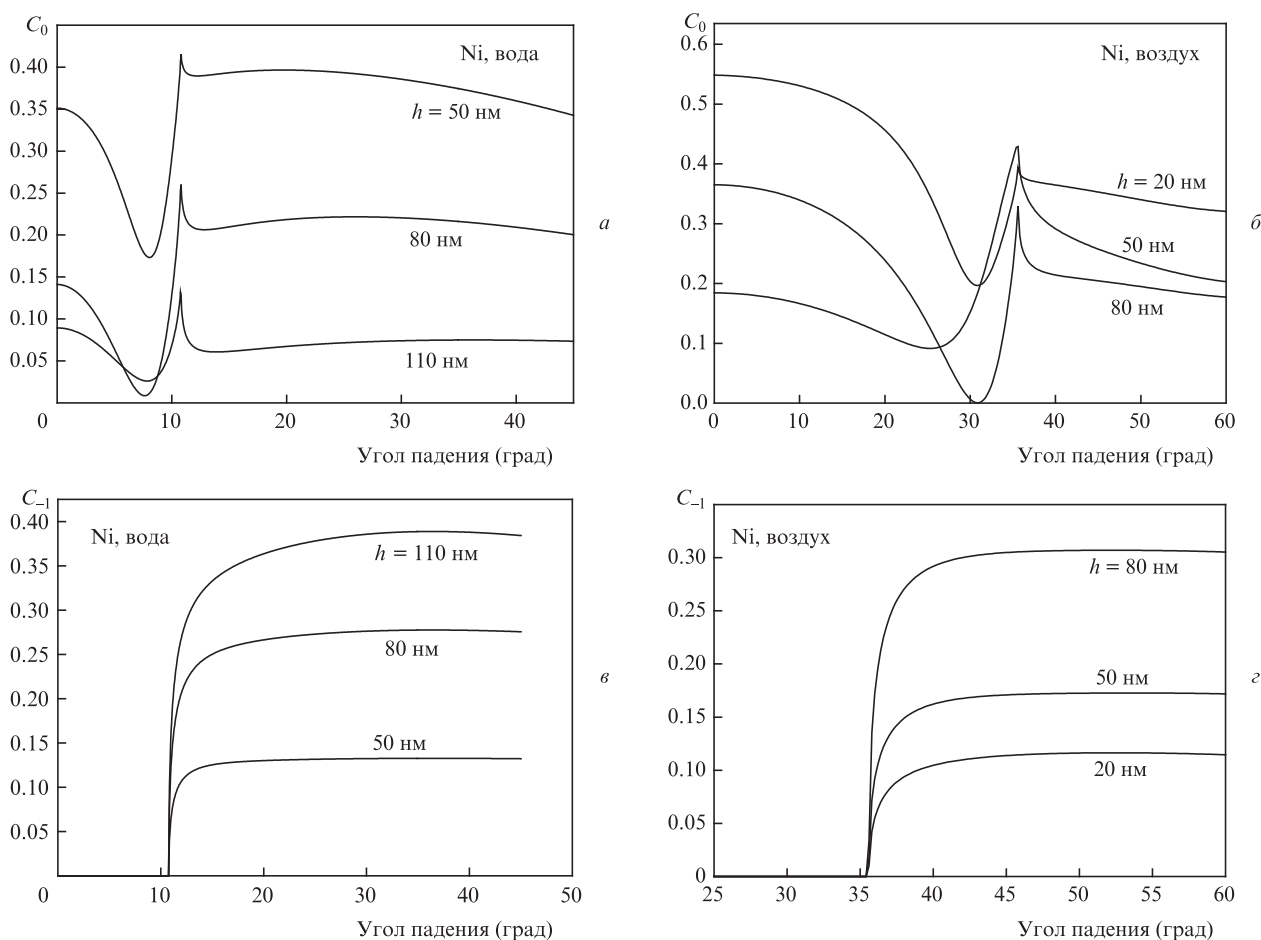


Рис.9. Зависимости дифракционной эффективности от угла падения излучения в воде (а, в) и в воздухе (б, г) для решеток из никеля с различной глубиной микрорельефа.

дены зависимости дифракционной эффективности решеток из никеля с периодом $\Lambda = 400$ нм от угла падения излучения с р-поляризацией с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм в воде и в воздухе. Видно, что эффективности дифракции в -1 -й порядок существенно различаются. Если в воде дифракция в -1 -й порядок имеет место при углах падения $\theta_i > 10^\circ$, то в воздухе -1 -й порядок дифрагированного пучка появляется лишь при $\theta_i > 35^\circ$.

3. Измерения

Были исследованы две группы образцов: оригинальные решетки и их никелевые реплики. Оригинальные решетки были изготовлены с использованием электронно-лучевой литографии [32] и травления в пленке полиметилметакрилата (ПММА), нанесенной на хромированную стеклянную подложку методом spin-coating технологии [33]. На рис.10 показано изображение решетки с периодом $\Lambda = 400$ нм, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Как следует из АСМ-измерений, форма профилей решетки хорошо описывается трапециевидальной моделью.

Дифракционные эффективности в зависимости от угла падения световых пучков красного, зеленого и синего цветов (R, G, B), излучаемых лазерами и лазерными диодами мощностью от 5 до 150 мВт, с диаметрами пучков 1–3 мм, были измерены с помощью оптического измерителя мощности. Отметим, что решетки, изготовленные из металлов, обладают устойчивостью к излучению достаточно большой мощности, а источники, используемые в блоках для объединения пучков в микропроекторных устройствах, имеют мощности менее 2 мВт.

На рис.11 представлены измеренные (точки) и рассчитанные (сплошные кривые) дифракционные эффективности для красного, зеленого и синего пучков света в зависимости от угла падения. Небольшие расхождения имеют место из-за несовершенного профиля решетки и неточности измерения высоты решетки. При углах падения 49.4° , 27.6° и 15° для красного, зеленого и синего пучков соответственно может быть получена эффективность объединения 70% для решетки с глубиной микрорельефа 80 нм. Более высокой эффективности можно достичь для решеток с большей глубиной микрорельефа, изготовленных из подходящего материала. При использовании решетки с глубиной $h = 170$ нм эффективность может превышать 85%.

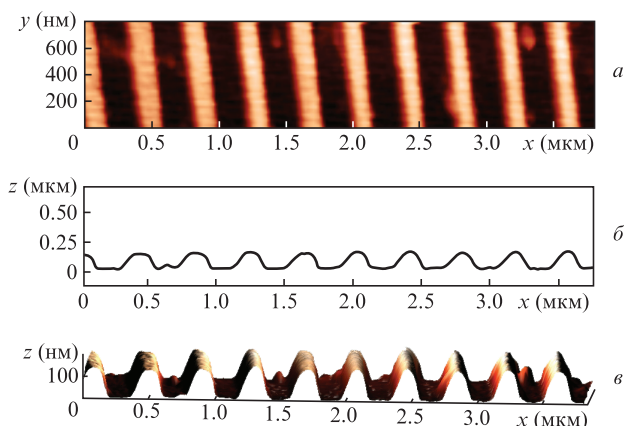


Рис.10. Изображения решетки, полученные на АСМ Смена, НТ-МДТ: вид сверху (а), вид сбоку (б) и 3D-изображение (в) ($\Lambda = 400$ нм).

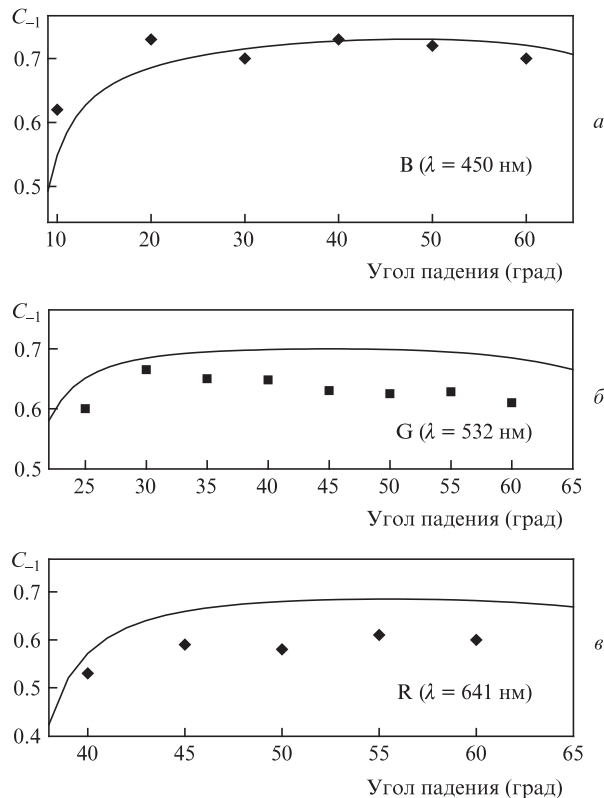


Рис.11. Расчетные (сплошные кривые) и измеренные (точки) дифракционные эффективности C_{-1} от угла падения света для серебряной решетки с периодом $\Lambda = 400$ нм и глубиной прямоугольного профиля $h = 80$ нм для синего света с $\lambda = 450$ нм (а), зеленого света с $\lambda = 532$ нм (б) и красного света с $\lambda = 641$ нм (в).

На рис.12 представлены результаты расчетов и измерений эффективности дифракции в нулевой порядок для никелевой решетки в зависимости от угла падения излучения с р-поляризацией при различных значениях глубины микрорельефа. Видно, что при угле падения $\sim 33^\circ$ имеет место эффект плазмонного резонанса. При глубине рельефа $h = 80$ нм и угле падения $\theta_i = 31^\circ$ практически вся падающая энергия поглощается решеткой. Отметим, что измеренные углы падения, при которых имеет место плазмонный резонансный эффект, хорошо согласуются с расчетными.

4. Обсуждение и заключение

Из результатов моделирования и экспериментов следует, что дифракционная эффективность выше для р-поляризованных падающих световых пучков. Это означает, что устройство, объединяющее падающие пучки R, G и B, должно быть рассчитано на р-поляризацию. Однако в этом случае имеет место явление поверхностного плазмонного резонанса, которое снижает эффективность устройства. Эти трудности могут быть устранены, если выбрать подходящие углы падения или использовать другой материал. Действительно, плазмонный резонанс происходит в узком диапазоне углов. Появление резонанса зависит от диэлектрической проницаемости материала, поэтому этот эффект существует не для всех металлов.

Отличительной особенностью субволновых решеток является то, что вся дифрагированная энергия пучка перераспределяется в 0-й и -1 -й порядки. Для обычных решеток, как видно из уравнения (1), существуют и другие порядки. Нулевой порядок может быть подавлен путем

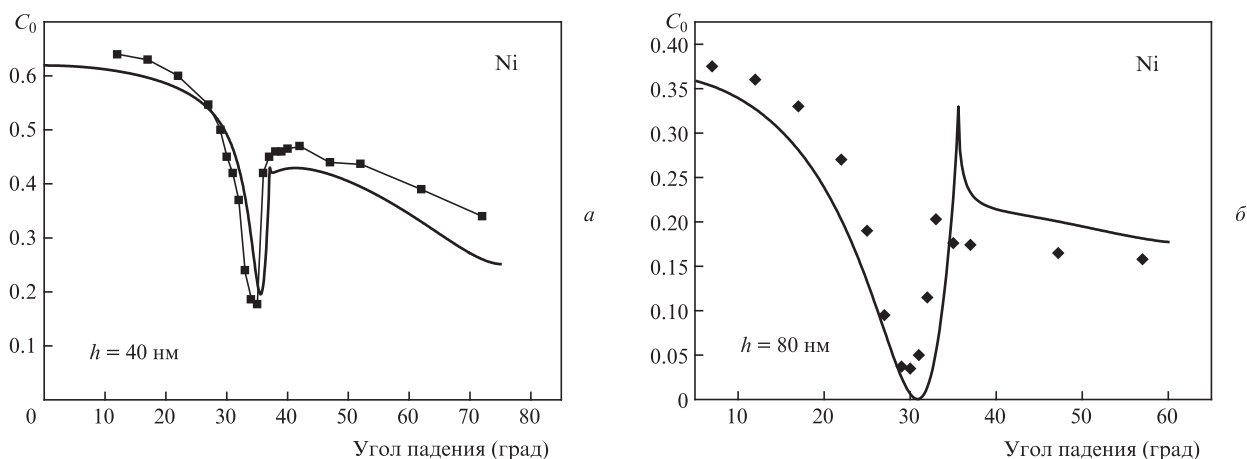


Рис. 12. Расчетные (сплошные кривые) и измеренные (точки) эффективности дифракции в нулевой порядок в зависимости от угла падения излучения с р-поляризацией для решетки из никеля с периодом $\Lambda = 400$ нм, глубиной $h = 40$ (а) и 80 нм (б) при длине волны излучения $\lambda = 641$ нм.

выбора глубины и формы решетки. Это позволяет получить высокую эффективность в -1 -м порядке для многоцветных пучков в широком спектральном диапазоне (450–650 нм) на одной и той же решетке.

Для субволновых решеток профиль может быть симметричным, причем высокой дифракционной эффективности можно достичь как для синусоидального, так и трапецеидального профиля. Следует отметить, что для трапецеидального профиля дифракционные эффективности слабо зависят от длины волны излучения, поэтому такие решетки предпочтительнее для практических применений.

При плазмонном резонансе возможно нахождение оптимальных параметров решетки (материал, глубина микрорельефа) и излучения (угол падения, поляризация), при которых отраженный и дифрагированный свет полностью отсутствуют, т.е. имеет место 100%-ное поглощение энергии падающего излучения видимого диапазона металлической субволновой решеткой. Это свойство может быть использовано при разработке различных устройств, в частности в солнечных батареях и дисплеях.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для субволновой решетки возможно получение высокой дифракционной эффективности в широком спектральном диапазоне (450–650 нм). Субволновые решетки могут найти применение в таких областях, как сенсоры и пико-проекторы, где эффективность и компактность являются определяющими факторами, а также для обработки изображения в 3D-дисплеях, проекционных дисплеях и т.д. Полученные результаты могут оказаться полезны при разработке новых устройств совмещения [34] и/или разделения пучков света, устройств на эффекте возбуждения плазмонов [35, 36].

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01461).

1. Tibuleac T.S., Magnusson R. *J. Opt. Soc. Am. A*, **14**, 1617 (1997).
2. Ghaemi H.F., Thio T., Grupp D.E., Ebbesen T.W., Lezec H.J. *Phys. Rev. B*, **58**, 6779 (1998).
3. Андреев А.В., Корнеев А.А., Мукина Л.С., Назаров М.М., Прудников И.Р., Шкуринов А.П. *Квантовая электроника*, **35**, 27 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 27 (2005)].
4. Андреев А.В., Грищенко Ю.В., Добындэ М.И. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **92**, 823 (2010).
5. Lee K.Y., Yoon J.W., Song S.H., Magnusson R. *Sci. Rep.*, **7**, 46508 (2017).

6. Block S., Gamet E., Pigeon F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41**, 1049 (2005).
7. Huang M.C.Y., Zhou Y., Chang-Hasnain C.J. *Nature Photon.*, **1**, 119 (2007).
8. Czynszanowski T., Gebiski M., Dems M., Wasiak M., Sarzała R., Panajotov K. *Sci. Rep.*, **7**, 40348 (2017).
9. Wang J., Ashrafi R., Adams R., Glesk I., Gasulla I., Capmany J., Chen L.R. *Sci. Rep.*, **6**, 30235 (2016).
10. Fattal D., Li J., Peng Z., Fiorentino M., Beausoleil R.G. *Nature Photon.*, **4**, 466 (2010).
11. Cheng Y.C., Zeng H., Trull J., Cojocaru C., Malinauskas M., Jukna T., Wiersma D.S., Staliunas K. *Opt. Lett.*, **39**, 6086 (2014).
12. Dammann H. *Appl. Opt.*, **17**, 2273 (1978).
13. Farn M.W., Stern M.B., Veldkamp W.B., Medeiros S.S. *Opt. Lett.*, **18**, 1214 (1993).
14. Liu Chun-Wei, Lee Chi-Hung, Yang Tzu-Chun, Ting Chia-Jen, Lin Tsung-Hsin, Lin Shih-Chieh. *Appl. Opt.*, **52**, 3617 (2013).
15. Veldkamp W.B., Leger J.R., Swanson G.J. *Opt. Lett.*, **11**, 303 (1986).
16. Cheung E.C., Ho J.G., Goodno G.D., Rice R.R., Rothenberg J., Thielen P., Weber M., Wickham M. *Opt. Lett.*, **33**, 354 (2008).
17. Shiono T., Hamamoto T., Takahara K. *Appl. Opt.*, **41**, 2390 (2002).
18. Destouches N., Tishchenko A.V., Pommier J.C., Reynaud S., Parriaux O., Tonchev S., Abdou A.M. *Opt. Express*, **13** (9), 3230 (2005).
19. Petrov N.I. *Opt. Lett.*, **32**, 2744 (2007).
20. Petrov N.I., Nikitin V.G., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. *Appl. Opt.*, **53**, 5740 (2014).
21. Vial B., Demesy G., Zolla F., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **31**, 1339 (2014).
22. <http://www.fresnel.fr/files/gratings/Second-Edition/>.
23. Gremaux D.A., Gallagher N.C. *Appl. Opt.*, **32**, 1948 (1993).
24. <http://www.mcgrating.com/>.
25. Chandezon J., Maystre D., Raoult G. *J. Optics (Paris)*, **11**, 235 (1980).
26. Chandezon J., Dupuis M.T., Cornet G. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 839 (1982).
27. Li L. *J. Opt. Soc. Am.*, **11**, 2816 (1994).
28. <http://www.gsolver.com>.
29. <http://www.luxpop.com/#index%20of%20refraction%A0>.
30. <http://RefractiveIndex.info>.
31. Raether H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surface and on Gratings* (Berlin: Springer-Verlag, 1988).
32. Fujita T., Nishihara H., Koyama J. *Opt. Lett.*, **7**, 578 (1982).
33. Novikova T., De Martino A., Bulkin P., Nguyen Q., Drevillon B., Popov V., Chumakov A. *Opt. Express*, **15**, 2033 (2007).
34. Chaoa Weichung, Chi Sien, Wu Ching Yi, Kuo Chung J. *Opt. Commun.*, **151**, 21 (1998).
35. Sun Xiaoliang, Shu Xuwen, Chen Changhong. *Appl. Opt.*, **54**, 1548 (2015).
36. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. *Frontiers in Optics/Laser Science Conf. (FiO/LS)* (Washington, USA, 2017, Paper JW3A.107).