

УДК 534.212

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ В ИК-ДИАПАЗОНЕ: АНОМАЛИИ ПОГЛОЩЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ

А. А. Карабутов, И. А. Кудинов, В. Т. Платоненко, М. А. Согоян

(кафедра общей физики и волновых процессов)

С помощью оптико-акустического эффекта исследовано поглощение ИК-излучения металлическими дифракционными решетками. Обнаружены узкие пики, соответствующие резонансному возбуждению ПЭВ. Исследована зависимость ширины пиков от длины пробега ПЭВ и ширины углового спектра излучения. Экспериментально обнаружено макроскопическое перераспределение интенсивности излучения в зеркально отраженном от решетки пучке.

Проблемы взаимодействия лазерного излучения с реальной поверхностью составляют одно из быстро развивающихся направлений лазерной физики. Некоторые итоги исследований в этой области были подведены в обзоре [1].

Существенное влияние на взаимодействие лазерного излучения с поверхностью может оказывать ее рельеф, причем уже при глубинах рельефа $h \ll \lambda$ (λ — длина волны излучения). В условиях резонансного возбуждения поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) на поверхности с периодическим рельефом протекание различных процессов изменяется. Помимо известных аномалий Вуда [2] наблюдается аномально высокий энерговод излучения в металл и быстрый нагрев поверхности [3]; увеличение локального поля приводит к понижению порога нелинейных процессов, ускорению фотохимических реакций, низкوپороговому пробою вблизи поверхности. Теоретические расчеты [3—6] и экспериментальные данные [7—10] говорят о возможности резонансного роста поглощения излучения периодически рифлеными поверхностями (вплоть до полного подавления зеркального отражения). Теоретически предсказана возможность изменения пространственных и временных характеристик ограниченных во времени световых пучков при взаимодействии с поверхностями, имеющими периодический рельеф [6].

Экспериментальные исследования поглощения излучения дифракционными решетками в видимом диапазоне длин волн проводились в работах [7, 8]. Были обнаружены максимумы поглощения, имеющие большую угловую ширину вследствие небольшой длины пробега ПЭВ на этих частотах.

В ИК-диапазоне длина пробега ПЭВ возрастает. Поэтому можно ожидать сужения резонансных пиков (до 10^{-4} рад) на поверхностях с мелким, по сравнению с длиной волны, рельефом. В работе [9] широкие пики поглощения наблюдались при воздействии непрерывного излучения CO_2 -лазера на дифракционную решетку. Поглощение измерялось с помощью термопары по температуре облучаемого образца. Такие измерения длительны и трудоемки. В то же время большой интерес представляет исследование поглощения в импульсном режиме, который позволяет достигать существенно более высоких интенсивностей воздействия.

Измерять поглощение излучения металлическими поверхностями с периодическим рельефом по отражению довольно сложно. Малый коэффициент поглощения приводит к большой ошибке измерений, а на-

личие периодического рельефа — к возникновению многочисленных дифракционных порядков помимо зеркальной компоненты и к необходимости измерять интегральный коэффициент отражения. Поэтому при импульсном воздействии излучения на поверхность для измерения поглощения целесообразно использовать оптико-акустический (ОА) эффект [11]. В отличие от работ [7, 8], где использовался косвенный ОА-эффект и излучение попадало на неровную поверхность со стороны подложки, нам представляется предпочтительным регистрировать звук, возбуждаемый непосредственно в мишени. Это позволяет измерять поглощение света открытой поверхностью.

Целью предлагаемой работы являлось дальнейшее исследование поглощения ИК-излучения поверхностями с периодическим рельефом оптико-акустическим методом.

Поглощение излучения поверхностью с периодическим рельефом может существенно отличаться от поглощения плоской поверхностью уже при глубине рельефа $h \approx \lambda/30$ [1]. Наличие на поверхности периодического рельефа приводит к дифракции падающей электромагнитной волны. При этом проекции волновых векторов дифрагированных волн на плоскость поверхности составляют

$$k_t = k_0 \mp lq, \quad (1)$$

где $k_t = k_0 \sin \theta$ — проекция волнового вектора падающей волны k_0 на плоскость поверхности, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, θ — угол падения излучения, $q = 2\pi/d$ — вектор решетки, d — период, l — номер фурье-гармоники рельефа. Амплитуда тех дифрагированных волн, для которых $k_t \approx k_0$, может резонансно возрастать [3], что соответствует резонансному возбуждению ПЭВ при углах падения

$$\theta_p = \arcsin |1 - l\lambda/d|, \quad \theta_s = \arcsin \sqrt{1 - (l\lambda/d)^2}. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что резонансное возбуждение ПЭВ и связанные с ними аномалии поглощения возможны только когда штрихи рельефа перпендикулярны вектору напряженности электрического поля E .

Эффект резонансного возбуждения ПЭВ на периодических поверхностях сильно зависит от соотношения длины волны, глубины модуляции профиля, периода и оптических констант решетки. В общем случае ограниченного по пространству светового пучка форма пика поглощения излучения периодической поверхностью определяется сверткой резонансного фактора возбуждения ПЭВ и углового спектра лазерного излучения [5]. При этом угловая ширина пика поглощения $\Delta\theta = (\Delta\theta_r^2 + \Delta\theta_L^2)^{1/2}$, где $\Delta\theta_r$ — угловая ширина резонансного фактора, а $\Delta\theta_L$ — ширина углового спектра лазерного излучения. Если угловая ширина резонансного фактора ПЭВ много меньше ширины углового спектра излучения, то форма пика поглощения повторяет форму углового спектра лазерного излучения. Если соотношение ширин обратное, то пик поглощения соответствует резонансу возбуждения ПЭВ.

Установка включала импульсный ТЕА-СО₂-лазер, работающий на ТЕМ₀₀-моду. Длительность импульса составляла 1 мкс, энергия — около 50 мДж. Селективный резонатор с дифракционной решеткой позволял получать генерацию на одной из линий в 10Р-ветви, при этом спектральная ширина излучения составляла около 10^{-2} см⁻¹, а угловая расходимость — порядка 7' — контролировалась в каждой серии экспериментов.

Излучение СО₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм направлялось в центр исследуемой поверхности, расположенной на расстоянии 3,5 м

от лазера. Акустический сигнал, возбуждаемый при поглощении на поверхности части излучения, регистрировался с помощью пьезоэлемента, закрепленного на тыльной стороне облучаемой пластины. Заземленный корпус с исследуемым объектом располагался на поворотном столике гониометра, вращением которого изменялся угол падения излучения. Одновременно с измерением поглощения проводился контроль падающей энергии. Для этого из основного пучка с помощью делительной пластины часть излучения ответвлялась на откалиброванную ОА-ячейку.

Электронная схема обработки импульсов напряжения сигнального (с исследуемой пластины) и опорного (с ОА-ячейки) каналов включала селективные усилители, выделяющие компоненту импульса напряжения на резонансной частоте пьезоэлемента и усиливающие ее. Затем сигналы детектировались и поступали на входы двух АЦП. С помощью ЭВМ в каждом выстреле измерялись амплитуды импульсов напряжения сигнального и опорного каналов и вычислялось их отношение. Результат усреднялся по 10 импульсам. Работа всей системы синхронизировалась импульсом поджига лазера.

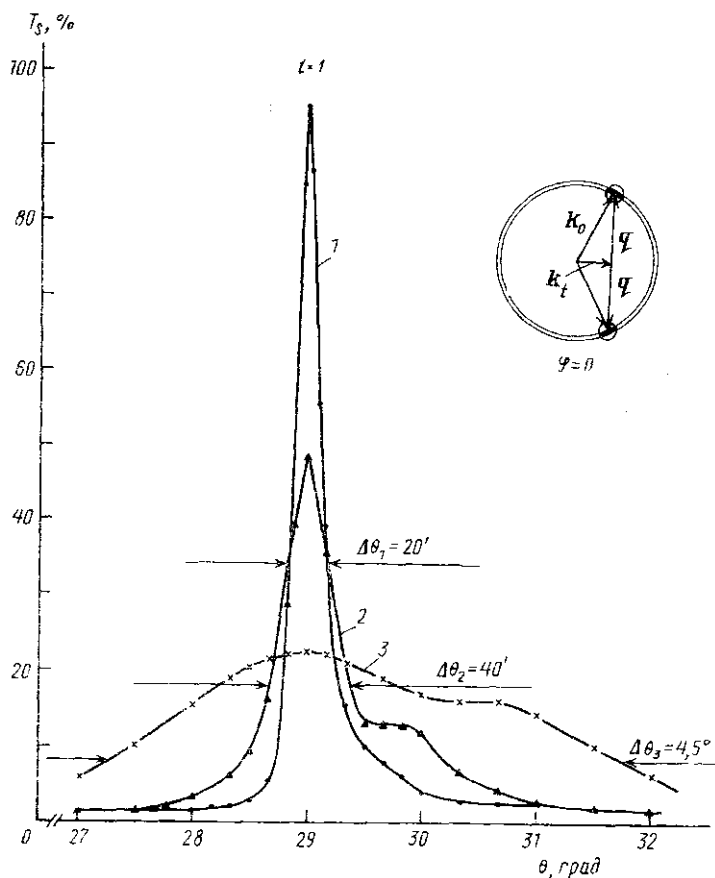


Рис. 1. Пик поглощения медной решетки вблизи основного резонанса возбуждения ПЭВ при падении S-поляризованного излучения с исходным угловым спектром (1), спектром, уширенным линзой с $f=1$ м (2) и $f=0,3$ м (3)

В качестве объекта исследования использовалась медная отражательная дифракционная решетка, изготовленная фотолитографическим методом на стеклянной подложке и покрытая сверху тонким предохраняющим слоем (1500 Å) фианита. Глубина решетки составляла $h = 0,42 \pm 0,02$ мкм, период $d = 12,09 \pm 0,04$ мкм, основание штрихов почти треугольного профиля составляло $8,6 \pm 0,8$ мкм.

В результате исследований были получены угловые зависимости коэффициента поглощения T решетки при S - и P -поляризации излучения (вектор $\mathbf{E}$ всегда перпендикулярен штрихам). На фоне слабого поглощения излучения плоской медной поверхностью ($T = (1,06 \pm 0,05)\%$) обнаружены узкие и сильные пики поглощения, положение которых соответствует резонансному возбуждению ПЭВ (2).

При S -поляризации в условиях одновременного возбуждения двух ПЭВ порядка $l = \pm 1$ наблюдалось почти полное подавление зеркального отражения (рис. 1). Величина поглощения достигала $(93 \pm 3)\%$. Ширина пика по уровню $1/e$ составляла $(20 \pm 1)'$ и определялась резонансным фактором ПЭВ, поскольку ширина спектра лазерного излучения не превышала $(6,0 \pm 0,5)'$. При уширении углового спектра лазерного излучения с помощью линз с фокусным расстоянием $f = 1$ и $0,3$ м ширину свертки начинала определять ширина углового спектра лазер-

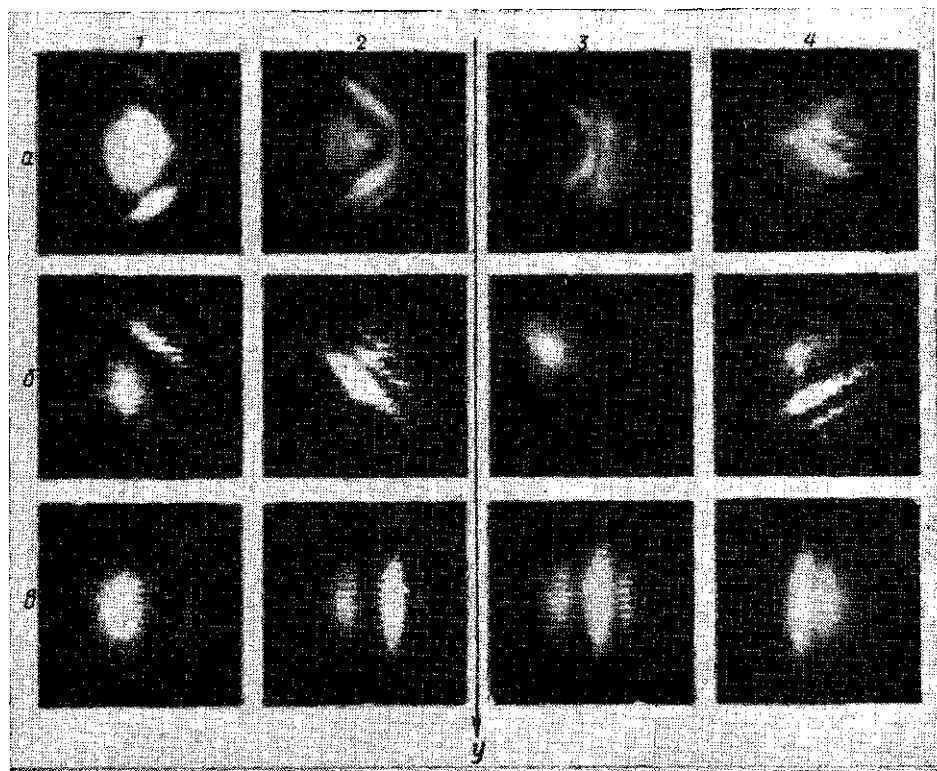


Рис. 2. Трансформация пятна зеркальной компоненты излучения с широким угловым спектром при изменении угла падения вблизи основного ($l=1$) резонанса возбуждения ПЭВ: а — S -поляризация: $\varphi=0$, $\theta=28^\circ 20'$ (1), 29° (2), $29^\circ 40'$ (3) и $30^\circ 47'$ (4); б — S -поляризация, $\varphi=4^\circ$, $\theta=26^\circ$ (1), 27° (2), 29° (3) и $34^\circ 40'$ (4); в — P -поляризация, $\theta=6^\circ 52'$ (1), $7^\circ 5'$ (2), $7^\circ 14'$ (3) и $7^\circ 27'$ (4)

ного излучения, что приводило к соответствующему уширению пика поглощения и уменьшению его амплитуды (см. рис. 1).

В случае когда угловой спектр излучения шире резонансного фактора возбуждения ПЭВ, периодически рифленая поверхность резонансно поглощает лишь часть гармоник углового спектра лазерного излучения (см. врезку на рис. 1). Поэтому происходит макроскопическое перераспределение электромагнитного поля в пучке зеркальной компоненты. Этот эффект был обнаружен нами экспериментально. На рис. 2, а приведены фотографии пятна зеркальной компоненты при облучении решетки S-поляризованным пучком, спектр которого уширен линзой с фокусным расстоянием $f=0,3$ м. Зависимость коэффициента поглощения для этих условий приведена на рис. 1 (кривая 3). Фотографии дают распределение интенсивности в пятне и показывают динамику трансформации этого распределения при изменении угла падения θ вблизи резонансного. Визуализация проводилась при помощи металлической пластины с горизонтальным рифлением, покрытой графитом.

Как видно из фотографий, в распределении интенсивности деформированных пятен наблюдаются провалы в виде двух наборов параллельных полос, каждый из которых соответствует одной из двух ПЭВ порядка $l=\pm 1$ и ориентирован перпендикулярно к направлению распространения ПЭВ (в нашем случае $\sim 30^\circ$ к горизонтали, см. врезку на рис. 1). Такая картина возникает вследствие интерференции отраженных волн и волн, порожжденной перерассеянием ПЭВ в нулевой порядок дифракции. Причем поглощение лишь части гармоник углового спектра, ширина которой определяется резонансным фактором возбуждения ПЭВ и много меньше ширины углового спектра падающего излучения, приводит к появлению в пятне не одного, а нескольких провалов в виде неэквидистантного набора полос, расположенных перпендикулярно к направлениям распространения ПЭВ. Мелкие горизонтальные штрихи, различимые на фотографиях, соответствуют рифлению визуализатора.

На рис. 3 изображены распределения нормированной интенсивности вдоль оси Y (см. рис. 2, а) в поперечном сечении зеркально отраженного пучка, соответствующие некоторым из приведенных фотографий. Кривые прописаны с шагом 0,25 мм при помощи оптико-акустической ячейки, имеющей на входном окне диафрагму диаметром 0,3 мм. Интенсивность нормировалась на максимальную интенсивность в падающем пучке I_0 . Пересечение в пятне двух наборов полос при некоторых углах падения приводит к ло-

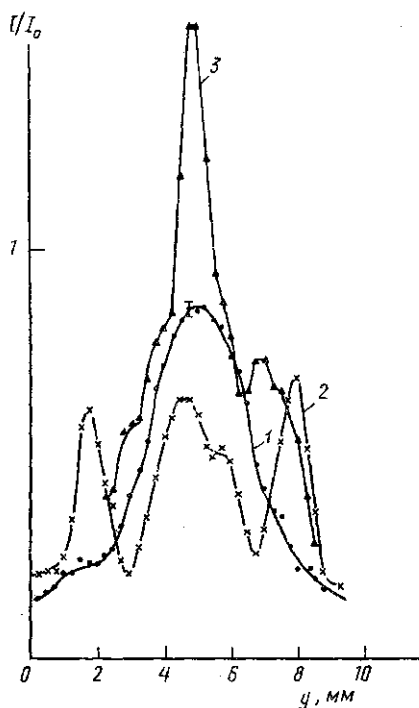


Рис. 3. Распределение нормированной интенсивности вдоль оси Y (см. рис. 2, а) в поперечном сечении зеркально отраженного пучка при углах падения $\theta=22^\circ 30'$ (1), 29° (2) и $30^\circ 24'$ (3)

кальному увеличению нормированной интенсивности в отраженном деформированном пятне по сравнению с падающим (рис. 3).

Для того чтобы разделить вклад двух ПЭВ как в пик поглощения, так и в изменение формы пятна зеркальной компоненты, решетка была выставлена под углом $\varphi=4^\circ$ к вектору $\mathbf{E}$ (см. врезку на рис. 4, $\varphi \neq 0$).

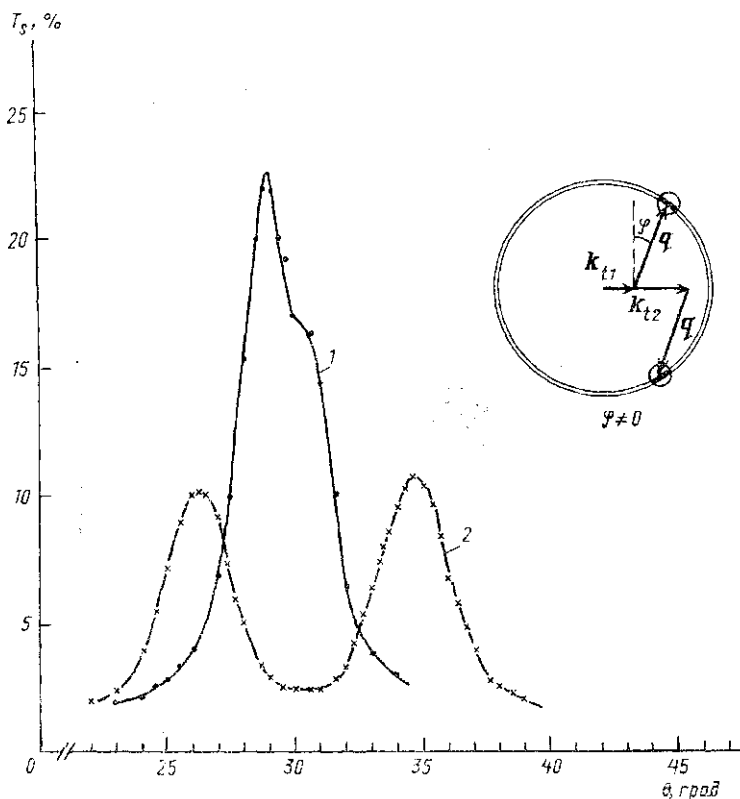


Рис. 4. Расщепление пика поглощения, соответствующего угловому спектру S -поляризованного излучения ($f=0,3$ м): 1— $\varphi=0$ (одновременное возбуждение двух ПЭВ); 2— $\varphi=4^\circ$ (раздельное возбуждение ПЭВ)

угол между вектором поля $\mathbf{E}$ и вектором решетки $\mathbf{q}$). В этих условиях резонансное возбуждение ПЭВ порядков $l=1$ и $l=-1$ происходит при разных углах падения излучения θ и пик поглощения, соответствующий резонансному фактору возбуждения ПЭВ, расщепляется.

Пик поглощения, определяемый угловым спектром лазерного излучения (при уширении первоначального спектра линзой с фокусным расстоянием $f=0,3$ м), при $\varphi=4^\circ$ также расщепляется. При этом амплитуда расщепленных пиков уменьшается вдвое по сравнению с суммарным пиком, а угловая ширина пиков, определяемая шириной углового спектра излучения, остается неизменной (рис. 4). В этих условиях в деформированном пятне зеркальной компоненты присутствует только одна система параллельных полос (рис. 2, б), соответствующая одной резонансно-возбужденной ПЭВ и ориентированная перпендикулярно направлению распространения ПЭВ (см. врезку на рис. 4). Фотографии зеркально отраженного пятна на рис. 2, б показывают, как по мере увеличения угла падения и резонансного возбуждения сначала

ПЭВ порядка $l=1$, затем $l=-1$ (рис. 4) одна система полос сменяет другую. В этом случае не наблюдается увеличения нормированной интенсивности в отраженном пятне.

Аналогичные исследования на медной решетке проводились и при P -поляризации лазерного излучения, когда имеются два резонанса возбуждения ПЭВ ($l=1$, $l=-2$). Амплитуда основного пика поглощения ($l=1$) достигала $(69 \pm 3)\%$, а угловая ширина по уровню $1/e$ равнялась $(10,0 \pm 0,5)^\circ$ (рис. 5), в то время как угловая ширина спектра ла-

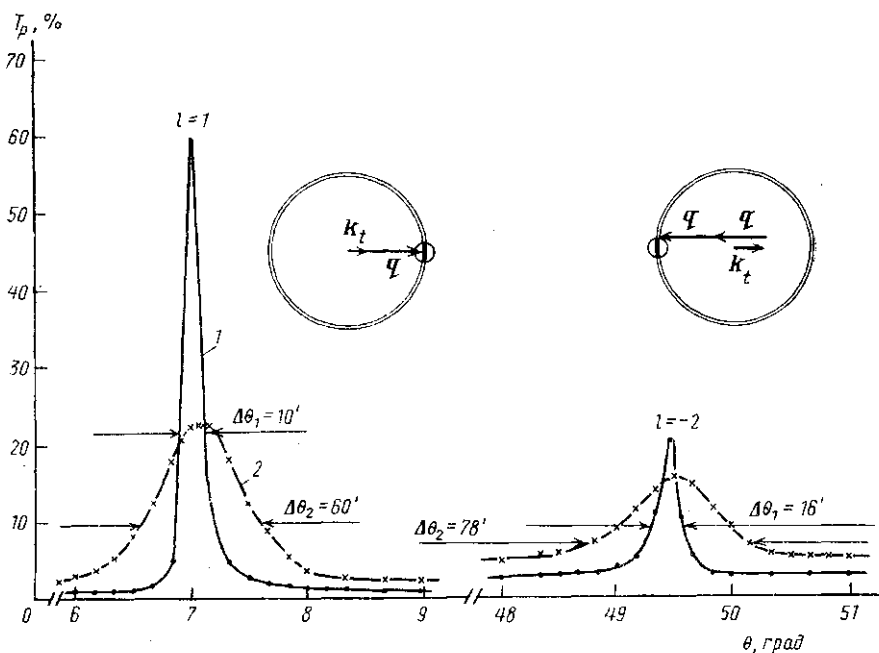


Рис. 5. Пики поглощения медной решетки вблизи основного ($l=1$) и неосновного ($l=-2$) резонансов возбуждения ПЭВ при падении P -поляризованного излучения с исходным угловым спектром (1) и спектром, уширенным линзой с $f=0,4$ м (2)

зерного излучения составляла $(6,0 \pm 0,5)^\circ$. Следовательно, пик поглощения определялся сверткой резонансного фактора ПЭВ и углового спектра лазерного излучения. Соответственно угловая ширина основного резонансного фактора возбуждения ПЭВ при P -поляризации лазерного излучения равнялась $(8,0 \pm 0,5)^\circ$.

На рис. 5 изображен также пик поглощения, соответствующий резонансному фактору возбуждения ПЭВ на неосновной фурье-гармонике рельефа решетки ($l=-2$) и имеющий небольшую, $(20,0 \pm 0,5)\%$, эффективность перекачки энергии излучения в ПЭВ.

После уширения углового спектра лазерного излучения с помощью фокусирующей линзы ($f=0,4$ м) пики поглощения уменьшались по амплитуде и уширялись в соответствующее число раз (см. рис. 5). При этом спектр лазерного излучения становился намного шире, чем резонансный фактор ПЭВ, что приводило к резонансному поглощению лишь части гармоник углового спектра лазерного излучения и соответственно к макроскопической деформации формы пятна зеркальной компоненты. На рис. 2, в приведены фотографии зеркально отраженно-

го пятна при облучении решетки P -поляризованным пучком, спектр которого уширен линзой с фокусным расстоянием $f=0,4$ м. Фотографии показывают динамику трансформации распределения интенсивности в пятне при изменении угла падения вблизи резонансного. В деформированном пятне наблюдаются провалы в виде одной системы полос, соответствующей возбуждению ПЭВ порядка $l=1$ и ориентированной перпендикулярно направлению распространения ПЭВ (в нашем случае вертикально, см. врезку на рис. 5).

Вблизи неосновного ($l=-2$) резонанса возбуждения ПЭВ эффект появления темных полос в пятне (спектр уширялся линзой $f=0,4$ м) менее ярко выражен, чем при $l=1$, так как величина эффективности перекачки энергии излучения в эту ПЭВ достигает лишь $(20 \pm 1)\%$. (см. рис. 5). Сама ПЭВ распространяется в противоположную k_z сторону (см. врезку на рис. 5) и при увеличении угла падения излучения θ переходит из поверхностной в радиационную. Поэтому полосы (в отличие от предыдущих случаев) при увеличении угла падения перемещаются слева направо.

Результаты

1. Обнаружены пики поглощения ИК-излучения периодически рифлеными поверхностями, соответствующие резонансному возбуждению ПЭВ.

2. Показана возможность измерять угловую расходимость лазерного излучения по ширине пиков поглощения на мелких отражательных решетках.

3. Экспериментально обнаружена макроскопическая деформация формы пятна зеркально отраженного от решетки излучения с широким угловым спектром вблизи резонанса возбуждения ПЭВ. Зафиксировано локальное увеличение нормированной интенсивности в деформированном пятне.

4. Показана возможность управления пространственными характеристиками пучка излучения при отражении от решеток с узким и эффективным резонансным фактором возбуждения ПЭВ.

Авторы выражают глубокую признательность В. М. Мананкову и В. П. Якунину за предоставленные дифракционные решетки, В. Н. Семиногову и В. И. Соколову за обсуждение результатов экспериментов, а также Г. И. Солomenцеву за помощь в оформлении результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Емельянов В. И., Семиногов В. Н. // Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. М., 1988. Т. 1. С. 118. [2] Wood R. W. // Phys. Rev. 1935. 48, N 12. P. 928. [3] Емельянов В. И., Семиногов В. Н. // Квант. электроника. 1987. 14, № 1. С. 47 [4] Ахманов С. А., Алексеев С. В., Семиногов В. Н., Соколов В. И. // Препринт НИЦТЛАН. 1987. № 26. [5] Семиногов В. Н., Соколов В. И. // Квант. электроника. 1989. 16, № 7. С. 1481. [6] Ахманов С. А., Панченко В. Я., Семиногов В. Н., Соколов В. И. // Квант. электроника. 1990. 17, № 12. С. 1533. [7] Hutley M. C., Maystre D. // Opt. Commun. 1976. 19, N 3. P. 431. [8] Inagaki T., Motosuga M., Yamamoto K., Arakawa E. T. // Phys. Rev. 1983. B28, N 4. P. 1740. [9] Ursu I., Mihailescu I. N., Pora Al. et al. // Appl. Phys. Lett. 1984. 45, N 4. P. 365. [10] Бендицкий А. А., Карабутов А. А., Кудинов И. А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1990. 31, № 3. С. 43. [11] Карабутов А. А., Уваров А. В. // Там же. 1988. 29, № 5. С. 64.