

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 534.212

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ
ИЗЛУЧЕНИЯ НЕГЛАДКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИА. А. Бендицкий, А. А. Карабутов, И. А. Кудинов, В. Т. Платоненко,
М. А. Согоян, А. В. Чугунов*(кафедра общей физики и волновых процессов)*

Исследуется поглощение излучения среднего ИК-диапазона периодической металлической поверхностью. Для измерения поглощенной энергии используется оптико-акустический эффект. Наблюдаются резкие узкие пики поглощения при углах падения света, соответствующих резонансному возбуждению поверхностных электромагнитных волн рассеянным излучением. Предлагается метод определения шероховатости поверхности и углового спектра лазерного излучения.

Исследования поглощения излучения поверхностью важны как с физической точки зрения, так и для практических приложений. Этой теме посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. Некоторые итоги подобных исследований были подведены в обзоре [1]. В последнее время особый интерес вызывает проблема поглощения излучения поверхностью с неплоским рельефом [2]. Теоретические расчеты [3, 4] и экспериментальные данные [5—7] говорят о возможности резонансного роста поглощения излучения при углах падения, соответствующих эффективному возбуждению поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ).

В работах [5, 6] экспериментальные исследования возбуждения ПЭВ проводились в видимом диапазоне длин волн. Были обнаружены максимумы поглощения, имеющие большую угловую ширину, что объясняется небольшой длиной пробега ПЭВ на этих частотах. В ИК-диапазоне можно ожидать сужения резонансных пиков. В работе [7] пики поглощения наблюдались на длине волны $\lambda=10,6$ мкм при непрерывном режиме воздействия. Поглощение измерялось с помощью термомпары 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. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенностей поглощения лазерных импульсов негладкими металлическими поверхностями на длине волны $\lambda=10,6$ мкм.

При импульсном воздействии излучения на поверхность для измерения поглощения целесообразно использовать оптико-акустический (ОА) эффект. В отличие от работ [5, 6], 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 [8].

Коэффициенты зеркального отражения и поглощения в случае гладкой поверхности описываются формулами Френеля [9]. При

$|\epsilon| \gg 1$ коэффициент поглощения T гладкой поверхности зависит от угла падения θ :

$$T_P = 4n / [(m^2 + n^2) \cos \theta] \quad (P\text{-поляризация}), \quad (1)$$

$$T_S = 4n \cos \theta / (m^2 + n^2) \quad (S\text{-поляризация}), \quad (2)$$

где $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' = (n + im)^2$ — диэлектрическая проницаемость среды.

В случае поверхности с периодическим рельефом поле внутри среды определяется суммой френелевской волны и волн, дифрагировавших на модуляциях профиля поверхности. В зависимости от частоты, поляризации и угла падения излучения определенные фурье-компоненты рельефа резонансно взаимодействуют с падающим излучением. Амплитуда дифрагировавших на них волн (в металлах это ПЭВ) может резко возрастать уже при малых амплитудах модуляции рельефа ($\sim \lambda/30$). Это ведет к существенному возрастанию поглощательной способности при углах падения θ [3]:

$$\theta_P = \arcsin |1 - lq/k_0| \quad (P\text{-поляризация}), \quad (3)$$

$$\theta_S = \arcsin [1 - (lq/k_0)^2]^{1/2} \quad (S\text{-поляризация}) \quad (4)$$

(во всех случаях штрихи перпендикулярны вектору \mathbf{E}), где l — номер гармоники рельефа, $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор падающего излучения, $q = 2\pi/d$ — волновой вектор решетки, d — период рельефа.

Поглощательная способность в случае падения плоской P -поляризованной волны равна [4]

$$T_P(a_q) = \frac{4n}{(m^2 + n^2) \cos \theta} \left\{ 1 + \frac{(k_0 a_q)^2 (1 \pm \sin \theta)^2 (m^2 + n^2)^2 / n^2}{[1 + (k_0 a_q)^2 (1 \pm \sin \theta)^2 (m^2 + n^2) / n \cos \theta]^2} \right\}, \quad (5)$$

а в случае падения плоской S -поляризованной волны

$$T_S(a_q) = \frac{4n \cos \theta}{(m^2 + n^2)} \left\{ 1 + \frac{2 (k_0 a_q)^2 \cos^3 \theta (m^2 + n^2)^2 / n^2}{[1 + 2 (k_0 a_q)^2 \cos^3 \theta (m^2 + n^2) / n]^2} \right\}, \quad (6)$$

где $2a_q$ — амплитуда произвольной фурье-компоненты рельефа.

При условиях, отличных от (3), (4), вторыми членами в фигурных скобках (5), (6) можно пренебречь. При этом поглощение на периодической поверхности происходит так же, как и на гладкой (см. (1), (2)).

Угловая ширина резонанса возбуждения ПЭВ зависит от длины пробега ПЭВ и определяется длиной волны падающего излучения, оптическими константами, глубиной и периодом рельефа. По теоретическим оценкам на длине волны 10,6 мкм она может достигать 10^{-4} рад.

Для ограниченного светового пучка форма пика поглощения света поверхностью определяется сверткой резонансного фактора возбуждения ПЭВ и углового спектра падающего излучения. Если угловая ширина резонанса ПЭВ мала, то форма пика поглощения повторяет угловой спектр лазерного излучения. В обратном случае пик поглощения соответствует резонансу возбуждения ПЭВ.

Поглощение излучения поверхностью ведет к нагреву приповерхностного слоя среды и контактирующего с ней газа и возбуждению звука за счет их теплового расширения. Спектр звуковых волн \bar{u}_2 , воз-

Буджаемых в мишени, был рассчитан в [10]. В случае металлов (малые толщины скин-слоя) он имеет вид

$$\tilde{v}_2 = \frac{\beta_2 (1 - 4c_{T2}^2/3c_{L2}^2) I_0 \tilde{f}(\omega)}{\rho_2 c_{p2}} \left[\frac{b}{N} - \sqrt{-i \frac{\omega}{\omega_0}} \right], \quad (7)$$

где β_2 — коэффициент объемного расширения, ρ_2 — плотность, c_{p2} — удельная теплоемкость, χ_2 — температуропроводность, c_T , c_L — скорости сдвиговых и продольных волн в материале мишени, $\omega_0 = c_L^2/\chi_2$ — характерная частота, $N = \rho_2 c_{L2}/\rho_1 c_{L1}$ — отношение акустических импедансов мишени и окружающей среды, $b = \beta_1 \sqrt{\chi_1}/\beta_2 \sqrt{\chi_2}$ — число, характеризующее относительную эффективность возбуждения звука при тепловом расширении мишени и окружающей среды, I_0 — интенсивность поглощаемого света, $f(\omega)$ — ее фурье-спектр.

В случае сравнительно низких частот $\omega \ll \omega_0 (b/N)^2$ первое слагаемое в (7) доминирует и акустические волны возбуждаются в основном за счет теплового расширения газа. Для металлической мишени в газовой среде это условие может выполняться в широком диапазоне частот. Так, например, для алюминия в воздухе он захватывает весь звуковой диапазон частот.

Если металл имеет вид тонкой пленки, напыленной на диэлектрическую подложку, то эта пленка прогревается равномерно, и в качестве параметров в формуле (7) надо брать параметры подложки. При этом в формуле (7) первое слагаемое будет доминировать во всем ультразвуковом диапазоне частот.

Метод измерения поглощения основывается на измерении спектральной компоненты $\tilde{v}_2(\Omega)$ на частоте $\Omega \ll \tau_L^{-1}$. Поскольку $\tilde{v}_2(\Omega) \sim I_0 \tilde{f}(\Omega)$, то величина $\tilde{v}_2(\Omega)$ будет пропорциональна величине поглощенной энергии $E_0 = I_0 \tilde{f}(\Omega=0)$ и коэффициент пропорциональности определяется только параметрами среды.

В качестве объекта исследований использовались две пластины с непериодическим рельефом, а также металлическая дифракционная решетка. Изучение поглощения периодическими и непериодическими поверхностями проводилось на установке, включающей CO_2 -лазер, работающий в импульсном режиме. Выбор для исследований именно CO_2 -лазера, в отличие от [5, 6], определялся большой длиной пробега ПЭВ на частоте его генерации по сравнению с частотами видимого диапазона для волн [2].

Схема проведения экспериментов была следующая (рис. 1). Излучение CO_2 -лазера (1) с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм и энергией около 100 мДж направлялось в центр исследуемой поверхности (3). Акустический сигнал, возбуждаемый при поглощении на поверхности, регистрировался с помощью пьезоэлемента, закрепленного на тыльной стороне облучаемой пластины. Заземленный корпус с исследуемым объектом располагался на поворотном столике гониометра (4), вращением которого изменялся угол падения излучения. Одновременно с измерением поглощения проводился контроль падающей энергии. Для этого из основного пучка с помощью делительной пластины (2) часть излучения ответвлялась на откалиброванную ОА-ячейку (13).

Электронная схема обработки импульсов напряжения сигнального (с исследуемой пластины) и опорного (с ОА-ячейки) каналов включала селективные усилители У2-8 (5) и В6-9 (12), выделяющие компоненту импульса напряжения на резонансной частоте пьезоэлемента Ω и усиливающие ее. Затем сигналы детектировались (6, 11) и поступа-

ли на входы двух АЦП типа Ф7077 (8, 10). С помощью ЭВМ типа ДЗ-28 (7) в каждом выстреле измерялись амплитуды сигнального и опорного каналов и вычислялось их отношение. Результат усреднялся по 10 выстрелам. Работа всей системы синхронизовалась импульсом поджига лазера (9). Измерение углов падения излучения проводилось с помощью гониометра с точностью не хуже $10''$.

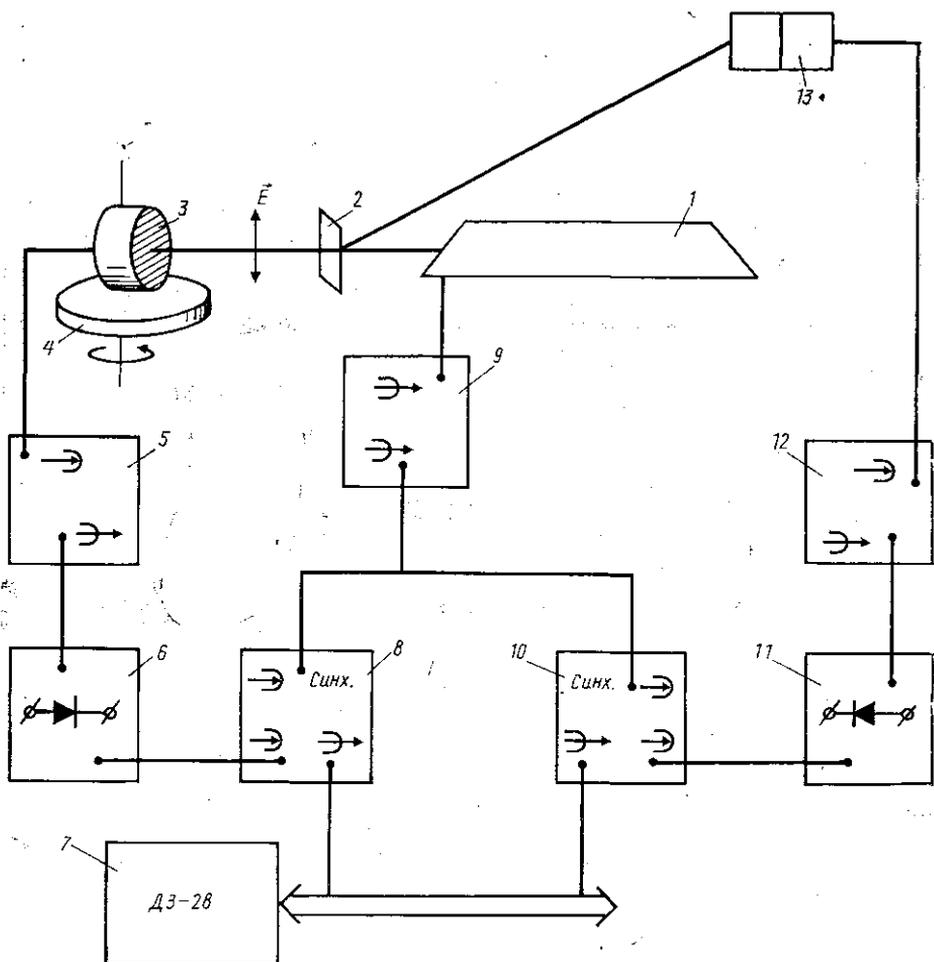


Рис. 1. Схема эксперимента

Для измерения абсолютного поглощения поверхностей была проведена калибровка сигнального канала по поглощенной энергии. Измерялась амплитуда звука, возбуждаемого в приповерхностном слое воздуха при нормальном падении излучения на абсолютно поглощающую, а затем и на другие исследуемые поверхности, при одновременном измерении напряжений сигнального и опорного каналов.

Для исследования поглощения на неперпериодических поверхностях использовались гладкая и шероховатая пластины из алюминия. После предварительной калибровки для обеих пластин были получены угловые зависимости коэффициента поглощения в случаях S- и P-поляри-

заций излучения. Данные эксперимента для гладкой пластины представлены на рис. 2. Там же указаны результаты расчетов угловой зависимости коэффициента поглощения по формулам Френеля (1), (2). В целом угловая зависимость коэффициента поглощения гладкой пластины совпадает с ходом кривых Френеля. Аналогичные результаты получены для шероховатой алюминиевой пластины.

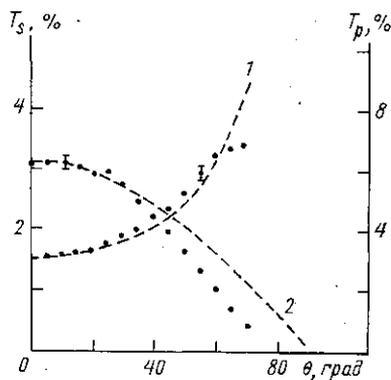


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента поглощения гладкой алюминиевой пластины при P (1) и S (2) поляризациях излучения: точки — эксперимент, штриховая кривая — расчет по формулам (1), (2)

В качестве объекта с периодической поверхностью использовалась дифракционная решетка, полученная напылением алюминия на стеклянную подложку. Решетка имела почти прямоугольный профиль и следующие параметры рельефа: период $d=29,9$ мкм и глубину модуляции профиля $H=1,0$ мкм.

В результате исследований поглощения на дифракционной решетке были определены экспериментальные угловые зависимости коэффициента поглощения в случае S - и P -поляризаций излучения. На фоне плавных кривых обнаружены резкие максимумы поглощения, положение которых совпадает с расчетами по формулам (3), (4). Величина основного максимума поглощения при S -поляризации излучения достигала 46%. Поведение пьедестала вдали от углов эффективного возбуждения ПЭВ должно совпадать с ходом кривых, рассчитанных по формулам Френеля (1), (2). Полученное расхождение экспериментальных и расчетных значений коэффициента поглощения с ростом угла падения в случае непериодических и периодических поверхностей объясняется увеличением диаметра пятна излучения на поверхности решетки, вследствие чего сказывается апертурная зависимость чувствительности пьезоэлемента.

Угловая зависимость чувствительности сигнального канала была определена экспериментально. Для этого результаты расчетов по формулам Френеля сравнивались с экспериментальными значениями коэффициента поглощения решетки при такой геометрии задачи, когда вектор E параллелен штрихам решетки и резонансного возбуждения ПЭВ не происходит. Как и ожидалось, угловая зависимость чувствительности одинакова для обеих поляризаций.

Угловая зависимость коэффициента поглощения решетки при S - и P -поляризациях излучения с учетом угловой зависимости чувствительности сигнального канала изображена на рис. 3. Поведение пьедесталов вдали от углов эффективного возбуждения ПЭВ совпадает с ходом кривых Френеля. Следовательно, возможно определять гармонические составляющие рельефа поверхности по отклонению угловых зависимостей коэффициента поглощения от кривых Френеля.

Ширина пиков поглощения решетки составила около $0,2^\circ$, что совпадало с угловой расходимостью падающего излучения. Значит, угловая ширина резонансного фактора возбуждения ПЭВ решетки по крайней мере меньше $0,1^\circ$, а форма пика поглощения соответствует угловому спектру лазерного излучения. Сделанный вывод подтверждался экспериментально. При уширении спектра падающего излучения с помощью фокусирующей линзы пропорционально увеличивалась ширина пика поглощения (рис. 4). Таким образом, представляется возможность измерять угловой спектр лазерного излучения при помощи исследования максимумов поглощения на оптимальных решетках.

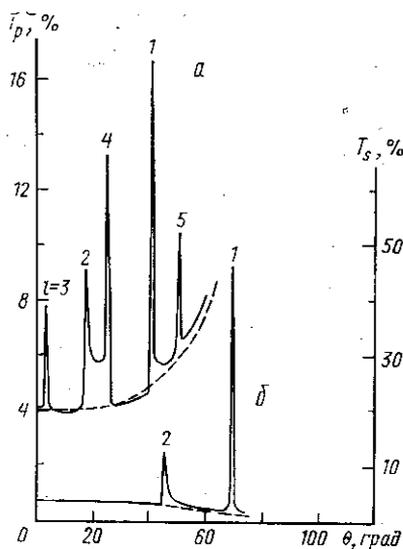


Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента поглощения алюминиевой дифракционной решетки при P (а) и S (б) поляризациях излучения: сплошная кривая — эксперимент, штриховая — расчет по формулам (1), (2)

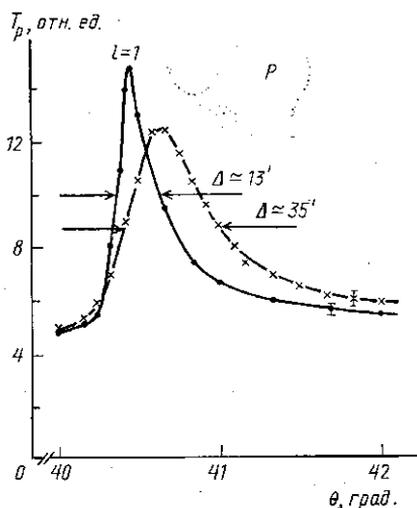


Рис. 4. Основной пик поглощения дифракционной решетки при P -поляризации излучения для двух угловых расходимостей ($l=1$)

Для этой же решетки исследовалось смещение положения основного ($l=1$) максимума поглощения в случае S -поляризации при изменении длины волны излучения. Результаты экспериментов и расчетов по формуле (4), как видно из таблицы, практически совпадают в пределах ошибки измерений.

Положение основного пика поглощения для различных длин волн при S -поляризации

λ , мкм	10,6	10,25	9,6	9,3
θ_{S1} (эксп.), град	$69,7 \pm 0,4$	$70,4 \pm 0,4$	$70,8 \pm 0,4$	$71,4 \pm 0,4$
θ_{S1} (теор.), град	69,3	70,0	71,3	71,9

Таким образом, экспериментально подтвержден резонансный характер поглощения на периодических поверхностях, найдены максимумы поглощения, положение которых практически совпадает с теоретическими расчетами. Подтверждено, что поведение угловых зависимостей коэффициента поглощения вдали от углов эффективного возбуждения ПЭВ описывается формулами Френеля. Предложен метод определения гармонических составляющих рельефа поверхности по отклонению угловых зависимостей коэффициента поглощения от кривых Френеля. Предложен метод измерения углового спектра лазерного излучения при помощи исследования максимумов поглощения на оптических решетках.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семиногов В. Н.//УФН. 1985. 147, № 4. С. 675. [2] Емельянов В. И., Семиногов В. Н.//Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии, М., 1988. С. 1. [3] Ахманов С. А., Семиногов В. Н., Соколов В. И.//Препринт НИЦТЛАН. 1987. № 25. [4] Емельянов В. И., Семиногов В. Н.//Квант. электроника. 1987. 14, № 1. С. 47. [5] Inagaki T., Motosuga M., Yamamori K., Arakawa E. T.//Phys. Rev. 1983. B28, N 4. P. 1740. [6] Inagaki T., Motosuga M., Arakawa E. T.//Phys. Rev. 1983. B28, N 8. P. 4211. [7] Ursa I., Mihailescu I. N., Popa A. C. et al.//Appl. Phys. Lett. 1984. N 4. P. 365. [8] Карабутов А. А., Платоненко В. Т., Руденко О. В., Чупрына В. А.//Квант. электроника. 1985. 12, № 10. С. 2126. [9] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.//Электродинамика сплошных сред. М., 1982. § 87. [10] Карабутов А. А., Уваров А. В.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. 29, № 5. С. 64.

Поступила в редакцию
22.06.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 3

УДК 621.378.325

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ФАЗЫ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В СИСТЕМАХ АДАПТИВНОЙ ФОКУСИРОВКИ

Ф. Ю. Канев, Е. А. Липунов, С. С. Чесноков

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Рассмотрены алгоритмы воспроизведения упругим зеркалом заданного фазового профиля светового пучка. Предложена эффективная процедура аппроксимации фазы, основанная на методе наименьших квадратов и позволяющая при малом числе каналов управления задавать фазовые поверхности первого и второго порядков с высокой точностью. На основе численной модели адаптивного зеркала выполнен анализ влияния параметров корректора на качество адаптивной фокусировки в линейной и нелинейной средах.

При компенсации теплового самовоздействия лазерных пучков на основе фазового сопряжения [1] возникает проблема воспроизведения упругим зеркалом заданной функции пространственных координат (фазового профиля). Одним из наиболее распространенных способов воспроизведения является коллокационное задание фазы, согласно которому поверхность прогиба зеркала поточечно совмещается с требуемой поверхностью посредством смещения сервоприводов [2]. К недостаткам такого подхода нужно отнести прежде всего значительное число каналов управления, необходимое для достижения концентрации поля на объекте с требуемой для практики точностью. В настоящей