

УДК 535.241

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУКРАТНОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО БРЭГГОВСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В. Б. Волошин, В. Н. Парыгин, Б. Траоре (Мали)

(кафедра физики колебаний)

Рассмотрена анизотропная брэгговская дифракция света на акустическом пучке, состоящем из двух волн ультразвука, распространяющихся в кристалле парателлурита в одном направлении и имеющих различные частоты.

Дифракция света на ультразвуке в оптически анизотропных средах может характеризоваться несколькими световыми дифракционными брэгговскими максимумами. Режимы многократной брэгговской дифракции, реализуемые в оптически анизотропных средах, были рассмотрены в работах [1, 2]. Большой практический интерес представляет изучение дифракции света на акустическом пучке, состоящем из двух волн ультразвука, распространяющихся в одном направлении и имеющих разные частоты — f_1 и f_2 [3, 4]. Дифракционная картина при этом будет состоять из трех дифракционных максимумов помимо нулевого. Каждый из этих максимумов является брэгговским. Теоретическое рассмотрение, проведенное в [4, 5], показало, что двукратная брэгговская дифракция имеет ряд особенностей по сравнению с известными случаями однократного брэгговского или многократного раманатовского акустooптического взаимодействия. К таким особенностям относится большая селективность рассеяния, а также возможность получения эффективности дифракции в дифракционных порядках вплоть до 100%. Целью настоящей работы явилась экспериментальная проверка возможности реализации двукратного брэгговского рассеяния света на ультразвуке в двухчастотном режиме дифракции.

Основной характеристикой оптически анизотропного акустooптического материала, определяющей его пригодность для использования в устройствах управления световыми потоками, является его акустooптическое качество M_2 [1]. Среди известных в настоящее время анизотропных материалов кристаллы TeO_2 обладают высоким значением коэффициента M_2 , поэтому при экспериментальных исследованиях был выбран именно кристалл парателлурита.

Для реализации многократного брэгговского рассеяния света на ультразвуке была создана экспериментальная установка, блок-схема которой показана на рис. 1. Световой пучок от источника излучения 1 с длиной волны $\lambda = 633$ нм после прохождения механического прерывателя 2, поляризатора 3, кварцевой пластинки $\lambda/4$ 4, диафрагмы 5 и шкалы отсчета углов падения 6 входит в акустooптическую ячейку 7 из парателлурита. Дифрагированный свет регистрировался с помощью фотоэлектронного умножителя 8 и наблюдался на экране осциллографа 9 или ВЧ-анализатора спектра 10. Акустические волны возбуждались одним пьезоэлектрическим преобразователем из ниобата лития, на который поступал управляющий электрический сигнал от двух генераторов ВЧ-мощности 11 и 12. Исследование проводилось в режиме бегущих волн ультразвука, поэтому генераторы ВЧ-мощности работали в импульсном режиме. Для запуска генераторов и синхронизации схемы использовался генератор импульсов 13.

Для уменьшения взаимного влияния генераторов друг на друга ВЧ-мощность, отбираемая от каждого из них, подавалась на пьезопреобразователь акустооптической ячейки через буферное устройство — сумматор 14. Сумматор представлял собой резистивный делитель, собранный на активных сопротивлениях $R_1 = R_2 = 50$ Ом и $R_3 = 5$ Ом. Напряжение электрического сигнала на выходе сумматора, как видно из рис. 1, оказывается ниже исходного, поэтому в экспериментальной установке использовался ВЧ-усилитель мощности 15. Амплитуды электрических сигналов на пьезопреобразователе акустооптической ячейки

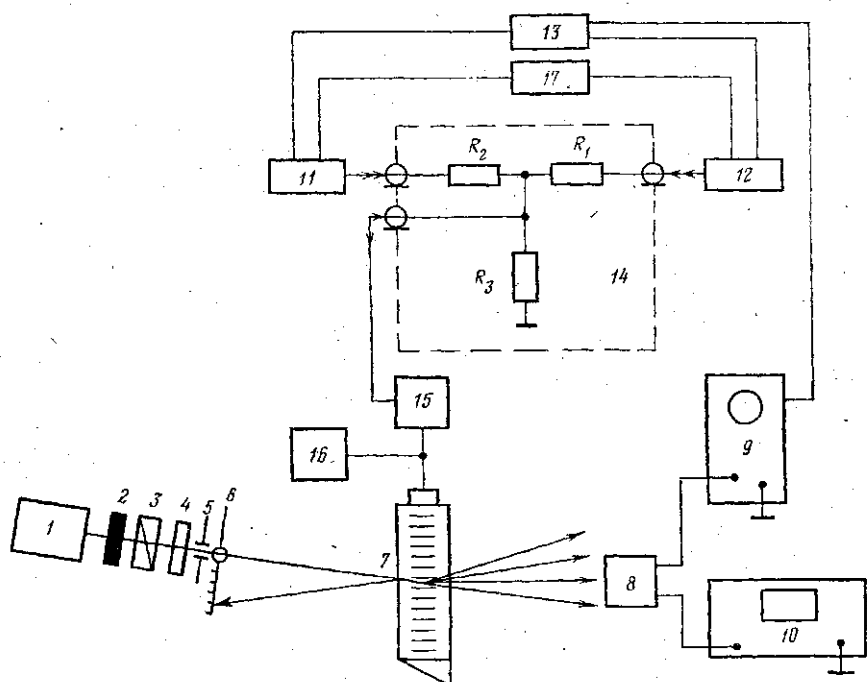


Рис. 1

контролировались вольтметром 16, частоты ультразвуковых волн измерялись частотомером 17. Акустооптическая ячейка представляла собой образец парателлурита с размерами $1,2 \times 0,6 \times 0,75$ см вдоль направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$ и $[001]$. Световой пучок распространялся в плоскости $(1\bar{1}0)$ вблизи оптической оси кристалла, акустические волны генерировались преобразователем вдоль направления $[110]$ в виде импульсов длительностью $\tau \approx 5$ мкс. Предварительное экспериментальное исследование акустооптической ячейки показало, что пьезопреобразователь возбуждает в кристалле TeO_2 ультразвук в полосе частот $\delta f = 25 - 55$ МГц. Эффективная длина области взаимодействия света и звука составляет $l = 0,6$ см [6].

Режим эффективной многократной дифракции в выбранном срезе кристалла TeO_2 реализуется на длине волны света $\lambda = 633$ нм на частотах ультразвука в несколько десятков мегагерц [5]. В парателлурите отношение акустических частот $\alpha = f_2/f_1$, обеспечивающих режим двукратной дифракции, может лежать в пределах $1 \leq \alpha \leq 30$. Например,

при $\alpha=1$ частоты $f_1=f_2=38$ МГц, при $\alpha=2$ частота $f_1=26,9$ МГц и $f_2=53,8$ МГц. Следует отметить, что из-за ограничения частотного диапазона преобразователя δf в эксперименте удалось провести измерения лишь на ультразвуковых частотах, отличающихся не более чем в два раза: $\alpha \leq 2$.

Обычно эффективность дифракции определяется как отношение интенсивности дифрагированного света к падающему световому потоку I . Проведенное теоретическое рассмотрение показало, что в случае брэгговского синхронизма эффективность дифракции изменяется по закону [5]

$$\begin{aligned} I_0 &= \cos^2 \frac{q_1 l}{2} \cos^2 \frac{q_2 l}{2}; \quad I_{11} = \sin^2 \frac{q_1 l}{2} \cos^2 \frac{q_2 l}{2}; \\ I_{12} &= \cos^2 \frac{q_1 l}{2} \sin^2 \frac{q_2 l}{2}; \quad I_2 = \sin^2 \frac{q_1 l}{2} \sin^2 \frac{q_2 l}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где q_1 и q_2 — параметры, определяющие эффективность рассеяния света на звуке и зависящие от амплитуды звуковых волн на частотах f_1 и f_2 соответственно. В соотношениях (1) сделаны обозначения: I_0 — интенсивность проходящего светового пучка, т. е. нулевой порядок дифракции; I_{11} и I_{12} — интенсивности двух дифракционных лучей, возникших в результате однократного взаимодействия с ультразвуком на частотах f_1 и f_2 соответственно.

Из соотношения (1) следует, что интенсивность дифрагированного света в каждом дифракционном порядке зависит от соотношения параметров q_1 и q_2 , т. е. определяется мощностью звуковых волн на частотах f_1 и f_2 . При соответствующем выборе мощностей акустических волн эффективность двукратного рассеяния может быть максимальной: $I_2/I = 100\%$, когда $I_2 = 1$. Оптимальным с точки зрения величины управляющей мощности является случай $q_1 l = q_2 l$. Эффективность двукратного рассеяния при этом достигает 100% , если $q l = \pi$.

Двукратное брэгговское рассеяние света на ультразвуке для $\alpha=2$ было реализовано экспериментально на частотах акустических волн $f_1=26,9$ МГц и $f_2=54,1$ МГц. На рис. 2 представлены зависимости эффективности дифракции первого максимума I_{11} (1), первого максимума I_{12} (2) и максимума двукратного рассеяния I_2 (3) от величины параметра $q l$, пропорционального напряжению электрического сигнала на пьезопреобразователе U , для оптимального случая $q_1 l = q_2 l$. Сплошными линиями на рис. 2 показаны теоретические зависимости, точками — экспериментальные данные.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов возможно, если известны величины электрического напряжения на пьезопреобразователе U_1 и U_2 , соответствующие условиям $q_1 l = \pi$ и $q_2 l = \pi$. Величины напряжений определялись экспериментально. При этом использовалось то обстоятельство, что условию $q_1 l = \pi$ соответствует максимальная эффективность дифракции $I_{11}/I = 100\%$ в первом дифракционном порядке при отсутствии акустической волны на частоте f_2 . Аналогично $I_{12}/I = 100\%$ при $q_2 l = \pi$ и $q_1 l = 0$. Определенные экспериментально значения напряжений, соответствующих условиям $q_1 l = \pi$ и $q_2 l = \pi$, оказались равными $U_1 = 4,2$ В и $U_2 = 6$ В. Следует отметить, что величины напряжений неодинаковы из-за неравномерности частотной характеристики пьезопреобразователя.

Представленные на рис. 2 данные говорят о хорошем соответствии теоретических и экспериментальных результатов. В количественном отношении различия между теорией и экспериментом объясняются не-

сколькими обстоятельствами: неоднородностью звуковых пучков, расходимостью оптического луча, недостаточной степенью эллиптичности поляризации оптического излучения на входе кристалла TeO_2 . При расчетах дифракционной задачи не учитывалась возможность существования минус первого и плюс третьего дифракционных максимумов, интенсивность которых, как показал эксперимент, составляет 1—2%. Тем не менее достижение во втором дифракционном максимуме эффективности дифракции $I_2/I=80\%$ при теоретическом значении $I_2/I=$

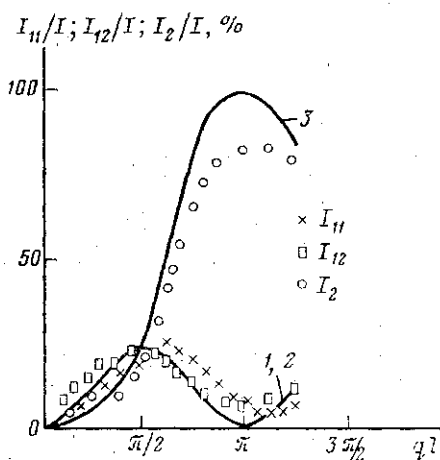


Рис. 2

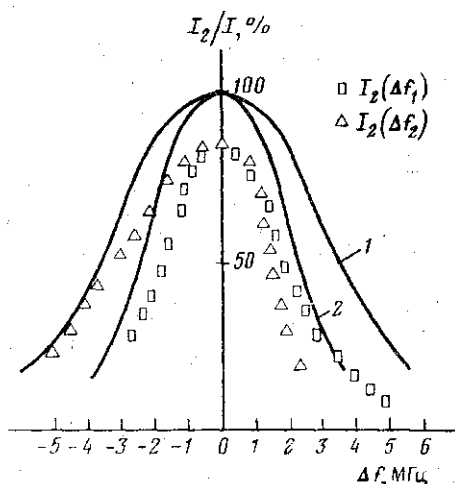


Рис. 3

$=100\%$ дает основание утверждать, что предложенная в работе [5] модель двукратного брэгговского анизотропного рассеяния является правильной.

Селективные свойства брэгговской дифракции могут быть оценены из зависимости дифракционной эффективности от величины коэффициента синхронизма ηl , пропорционального частотной расстройке Δf . Как было отмечено выше, при $\alpha=2$ условие брэгговского синхронизма реализовалось на частотах ультразвука $f_1=26,9$ МГц и $f_2=54,1$ МГц. При изменении одной из двух частот ультразвука и фиксированной второй частоте эффективность дифракционных максимумов падает. Это иллюстрирует рис. 3, где показаны частотные зависимости двукратной дифракции I_2/I_1 при фиксированной частоте f_2 и вариациях частоты f_1 (кривая 1), а также при $f_1=\text{const}$ и изменениях частоты f_2 (кривая 2). Уровни акустических мощностей были выбраны оптимальными: $q_1 l = q_2 l = \pi$. Некоторая несимметричность кривых $I_2(\Delta f)$ относительно точки $\Delta f=0$ объясняется ограничениями, вносимыми частотной характеристикой пьезопреобразователя δf . Из результатов, приведенных на рис. 3, следует, что полоса частот дифракции, оцениваемая по уровню 3 дБ, при изменении акустической частоты f_1 равна $\Delta f_1=2,4$ МГц при теоретическом значении $\Delta f_1=2,3$ МГц. Аналогично в случае изменения частоты f_2 полоса ультразвуковых частот $\Delta f_2=3,6$ МГц при теоретическом значении $\Delta f_2=3,5$ МГц [5]. Погрешность при определении значений Δf не превышает $\pm 0,1$ МГц. При сравнении данных теории и эксперимента использовались значения показателя преломления кристалла TeO_2 $n=2,41$ и скорости ультразвука $V=6,2 \cdot 10^5$ см·с $^{-1}$.

Особый интерес представляет случай дифракции при подаче на пьезопреобразователь двух ВЧ-сигналов равной или близкой частоты: $f_1 \approx f_2$. При синхронном взаимодействии, когда $\eta l = 0$, происходит двукратное рассеяние, рассмотренное в работе [2]. Если условие синхронизма нарушается, т. е. меняется одна из акустических частот, то дифракционная картина двукратного рассеяния отличается от известного случая. Полоса частот дифракции максимума I_2 оказалась равной $\Delta f = 4,0 \text{ МГц} \pm 3\%$ при расчетных значениях $\Delta f = 4,1$ и $4,5 \text{ МГц}$ в случае традиционного двукратного рассеяния [6].

Одновременное рассеяние света на двух дифракционных решетках с близкими, но не равными частотами f_1 и f_2 приводит к тому, что в направлении дифракционного максимума I_2 фактически распространяются три световых пучка, обусловленных двукратным рассеянием, с суммарным сдвигом частоты света в пучках на величины $2f_1$, $2f_1 + \Delta f$ и $2f_1 + 2\Delta f$. Первый из пучков соответствует двукратному рассеянию на решетке с частотой f_1 , второй луч рождается в результате дифракции на решетке частоты f_1 и последующего рассеяния на ультразвуке с частотой $f_1 + \Delta f$. Третьему лучу соответствует двукратное рассеяние на решетке с частотой $f_1 + \Delta f$.

Если величина частотной расстройки невелика, то все три луча практически идут в одном направлении. Дифракционные максимумы, соответствующие этим пучкам, перекрываются. Из-за разницы в частотах световых пучков фотоприемник, одновременно регистрирующий три пучка, фиксирует амплитудную модуляцию интенсивности дифрагированного света. Очевидно, что сигнал биений на выходе приемника имеет гармонические составляющие на частотах Δf и $2\Delta f$ [5]. Для наблюдения биений и анализа спектрального состава дифракционной картины использовался анализатор спектра 10 (см. рис. 1). Измеренная зависимость амплитуд первой гармоники биений A (кривая 1) и второй гармоники B (кривая 2) от частотной расстройки Δf показана на рис. 4.

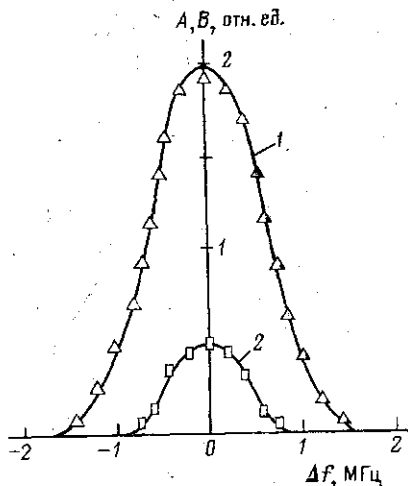


Рис. 4

Теоретическое рассмотрение показало, что при $\Delta f \rightarrow 0$ отношение амплитуд $A/B = 4$. При увеличении частотной расстройки амплитуды убывают, причем селективность брэгговского рассеяния сильнее сказывается на гармонике, соответствующей биениям на частоте $2\Delta f$. Экспериментальное исследование подтвердило теоретический вывод: при $\Delta f \rightarrow 0$ отношение амплитуд $A/B = 3,8$.

Следует отметить, что экспериментальное исследование двукратного рассеяния света на ультразвуке проводилось при всех значениях параметра α , лежащих в пределах $1 \leq \alpha \leq 2$. Максимальное отличие эксперимента и теории не превышало 20%.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование показывает правильность теоретических выводов о возможности реализации анизотропного брэгговского взаимодействия в двухчастотном режиме дифракции. Сравнение теоретических и экспериментальных ре-

зультатов указывает на соответствие теории и эксперимента. Экспериментальные исследования подтверждают выводы о перспективности использования режима двукратной дифракции в устройствах управления оптическим излучением и оптической обработки информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Балахший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М., 1985. [2] Волошинов В. Б., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1976. 17, № 3. С. 305. [3] Антонов С. Н., Проклов В. В. // ЖТФ. 1987. 53, № 2. С. 306. [4] Волошинов В. Б., Парыгин В. Н., Траоре Б. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. «Проблемы оптической памяти». Ереван, 1987. Ч. 1. С. 174. [5] Волошинов В. Б., Парыгин В. Н., Траоре Б. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. 29, № 5. С. 50. [6] Азаматов З. Т., Беликов И. Б., Волошинов В. Б. и др. // Там же. 1984. 25, № 1. С. 59.

Поступила в редакцию
17.05.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 4

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.826.038.824

ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИМПУЛЬСОВ В ЛАЗЕРАХ НА КРАСИТЕЛЕ С СИНХРОННОЙ НАКАЧКОЙ

Д. П. Криндач, В. И. Новодережкин

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Теоретически и экспериментально исследованы зависимости длительности импульса и параметра чирпа от длины волны генерации в непрерывном лазере на красителе с синхронной накачкой.

Процессы фазовой модуляции оказывают существенное влияние на характеристики лазеров на красителе, работающих в режиме стационарной синхронизации мод [1, 2]. В случае пассивной и комбинированной синхронизации мод фазовая модуляция возникает в результате насыщения поглощения и эффекта Керра в растворе поглощающего красителя [3—5]. В работе [6] на основе численного расчета показано, что сильная фазовая модуляция может наблюдаться и в лазерах с синхронной накачкой вследствие насыщения усиления. Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию непрерывного лазера на красителе с синхронной накачкой с учетом эффектов фазовой модуляции.

Будем считать, что в стационарном режиме эволюция светового импульса при прохождении внутрирезонаторных элементов определяется малыми относительными добавками к комплексной амплитуде, сумма которых равна нулю за полный обход резонатора. Представляя поле в виде

$$E(\eta, z) = A(\eta, z) \exp\{i\omega_L \eta - ikz\} + \text{к. с.}, \quad (1)$$

где k — волновой вектор, ω_L — несущая частота, и используя ту же