

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МОДУЛЯТОРА НА ДВУХ ВСТРЕЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ БЕГУЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ В МОЛИБДАТЕ СВИНЦА

И. И. Адрианова, В. Е. Каранетян, А. М. Морозов и В. Е. Терентьев

Сообщается о разработке и исследовании дифракционного модулятора на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых волнах в монокристаллическом молибдате свинца. Монокристаллы получены путем вытягивания из расплава на воздухе со скоростью 5–10 мм/ч при медленном вращении (1–5 об./мин) на заправку, ориентированную по оси [100]. Проведено сравнение модуляционных характеристик разработанного модулятора и аналогичных характеристик модулятора на стоячей ультразвуковой волне, возбужденной в образце того же акустооптического материала. Показано, что применение явления дифракции излучения на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых волнах позволяет осуществить модуляцию на тех же частотах ~ 50 МГц, что в случае дифракции на стоячей ультразвуковой волне. Вместе с тем первый режим модуляции по сравнению со второй характеризуется большей шириной амплитудно-частотной характеристики, определяемой частотной характеристикой излучателя ультразвука, а также большим интервалом рабочих температур.

Дифракция оптического излучения на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых (УЗ) волнах представляет собой одно из перспективных явлений, на основе которого могут быть созданы модуляторы нового типа [1–4]. В указанных работах применены акустооптические (АО) ячейки на жидких средах, что ограничивает как частоту модуляции величиной  $5 \leq 2f \leq 30$  МГц из-за сильного поглощения ультразвука на более высоких частотах, так и спектральный диапазон вследствие поглощения инфракрасного излучения. Расширение спектрального диапазона и увеличение частоты модуляции могут быть получены при переходе на твердые материалы с высокой АО активностью. В настоящей работе проводятся экспериментальные исследования модуляционных характеристик дифракционного модулятора на двух встречных пространственно разнесенных бегущих УЗ волнах в монокристаллическом молибдате свинца.

Расчет дифракции Рамана—Ната на двух встречных пространственно разнесенных бегущих УЗ волнах сводится к определению светового поля на выходе из второй УЗ волны и последующему вычислению обычного дифракционного интеграла. Согласно расчету, основанному на применении результатов работ [1, 4–6], модуляция излучения при дифракции на двух встречных пространственно разнесенных бегущих УЗ волнах, подобно модуляции при дифракции на стоячей УЗ волне, осуществляется с частотами, кратными удвоенной частоте ультразвука.

Глубина модуляции излучения с удвоенной частотой ультразвука в нулевом дифракционном максимуме равна

$$m = \frac{2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(v) J_n(Qv) J_{n-1}(v) J_{n-1}(Qv)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(v) J_n^2(Qv)}, \quad (1)$$



$$v = \frac{kl}{\cos \gamma_1} \Delta n \frac{\sin\left(\frac{Kl}{2} \operatorname{tg} \gamma_1\right)}{\frac{Kl}{2} \operatorname{tg} \gamma_1}, \quad (2)$$

$$Q = q \frac{\sin\left(\frac{Kl}{2} \operatorname{tg} \gamma_2\right) / \sin \gamma_2}{\sin\left(\frac{Kl}{2} \operatorname{tg} \gamma_1\right) / \sin \gamma_1}. \quad (3)$$

Здесь  $J_n(v)$  — функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $K=2\pi/\Lambda$  — волновые числа,  $\lambda$ ,  $\Lambda$  — длины волн соответственно излучения и ультразвука в АО материале,  $l$  — длина пути излучения в каждой из двух УЗ волн,  $\Delta n$ ,  $q\Delta n$  — амплитуды изменения показателя преломления в АО материале под действием УЗ волны,  $q$  — отношение этих амплитуд ( $0 \leq q \leq 1$ ), соответственно  $0 \leq Q \leq 1$  для  $\gamma_1 = \gamma_2$ ,  $\gamma_1$  — угол между направлением распространения излучения и фронтом первой по ходу луча УЗ волны,  $\gamma_2$  — то же для второй УЗ волны; при направлении оси луча параллельно фронтам УЗ волн за величину углов  $\gamma_1 = \gamma_2$  можно принять половину угла расходимости излучения. Отметим, что выражения, стоящие в числителе и знаменателе (1), пропорциональны соответственно переменной  $I_{\sim}$  и постоянной  $I_0$  составляющим излучения в нулевом дифракционном максимуме.

Основное отличие рассматриваемого случая от дифракции излучения на стоячей ультразвуковой волне [1, 9] состоит в том, что стоячая волна не образуется, так как бегущие УЗ волны разнесены в пространстве. В результате глубина модуляции должна оставаться той же в полосе частотной характеристики излучателя ультразвука, а температурная нестабильность глубины модуляции должна определяться в основном температурной зависимостью АО активности материала  $M = n^6 p_{\text{эфф.}}^2 / \rho V^3$  ( $p_{\text{эфф.}}$  — эффективная упругооптическая постоянная,  $\rho$  — плотность,  $V$  — скорость ультразвука [7]). Для оптических стекол и кристаллов на основании известных данных по термооптическим свойствам, например [8], относительное изменение глубины модуляции с температурой можно ожидать малым:  $\left| \frac{1}{M} \frac{dM}{dT} \right| \approx \left| \frac{1}{M} \frac{dM}{dT} \right| \sim 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ .

Из анализа (1)–(3) видно, что глубина модуляции  $m$  и постоянная составляющая излучения  $I_0/I_{0\text{макс.}}$  зависят от отношения  $q$  амплитуд изменения показателя преломления в бегущих УЗ волнах.

Для малых интенсивностей ультразвука  $m$  пропорциональна  $q$ . Значению  $Q = q = 0$  отвечает отсутствие модуляции при дифракции излучения на одной бегущей УЗ волне, а значению  $Q = q = 1$  — наибольшая глубина модуляции. Для получения того же значения глубины модуляции  $m$  с уменьшением длины волны ультразвука  $\Lambda$  и увеличением длины пути излучения  $l$  в УЗ волне, как следует из выражения (3) для  $Q$ , необходимо уменьшать непараллельность фронтов  $\gamma_2 - \gamma_1$  ультразвуковых волн.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение значения глубины модуляции  $m$  в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от частоты ультразвука, температуры АО элемента, угла падения луча к фронту УЗ волны, напряжения питания модулятора на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых волнах.

Экспериментальное исследование дифракции и модуляции излучения в зависимости от указанных параметров проведено с помощью дифракционного модулятора, АО элемент которого изготовлен из двух идентичных призм монокристаллического молибдата свинца. Монокристаллы молибдата свинца были получены путем вытягивания из расплава на воздухе в установке с индукционным нагревом платиновых тиглей. Установленный непосредственно над тиглем с раствором дополнительный нагреватель обеспечивал невысокое значение вертикального температурного градиента



(около 30 К/см). В качестве исходного материала применялась стехиометрическая смесь окислов  $PbO$  и  $MoO_3$ . Выращивание проводилось со скоростями 5–10 мм/ч при медленном вращении (1–5 об./мин) на заправку, ориентированную по оси [100], в направлении, наиболее удобном для изготовления рабочих элементов, с максимальным для  $PbMoO_4$  коэффициентом АО активности.

Расположение призм АО элемента и ориентации кристаллографических осей относительно направлений распространения излучения и ультразвуковых волн показана на рис. 1. Диаметр светового окна модулятора составляет 4 мм, размер каждой призмы в направлении распространения излучения 20 мм. В качестве излучателей ультразвука применены пластины из ниобата лития  $36^\circ YZ$ -среза на резонансную частоту  $f_0 = 26$  МГц. С целью

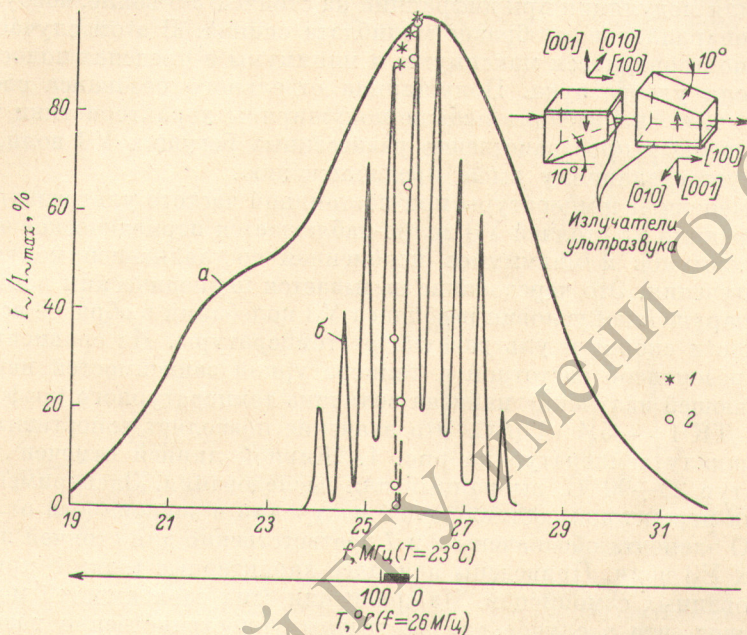


Рис. 1. Переменная составляющая  $I_{\sim} / I_{\sim, \max}$  излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от частоты ультразвука  $f$  при  $T = 23^\circ C$  (кривые *а*, *б*) либо в зависимости от температуры АО элемента  $T$  на частоте ультразвука  $f = 26$  МГц.

*а* — две встречные пространственно разнесенные бегущие УЗ волны возбуждены согласно схеме, *б* — стоячая ультразвуковая волна в образце без скоса. Температурные зависимости обозначены 1 и 2 соответственно для режимов *а*, *б*.

получения режима бегущей ультразвуковой волны в каждой призме их грани, противоположные излучателям ультразвука, были скошены под углом  $10^\circ$ .

Исследования глубины модуляции с удвоенной частотой ультразвука и постоянной составляющей излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от напряжения на модуляторе проводилось по разработанной ранее методике [9]. Ошибка измерения глубины модуляции не превышала  $\pm 5\%$ .

В исследованиях амплитудно-частотной характеристики модулятор возбуждался от измерителя частотных характеристик, напряжение с выхода которого предварительно усиливалось с помощью широкополосного усилителя. На вход того же измерителя подавалось напряжение, образуемое на нагрузке ФЭУ фототоком нулевого дифракционного максимума. Ошибка измерения разности частот не превышала 10 кГц.

Для исследования зависимости глубины модуляции и постоянной составляющей излучения в нулевом дифракционном максимуме от температуры модулятор термостатировался. Температура кристалла измерялась с ошибкой не более  $\pm 1^\circ C$ .



Исследования однородности ультразвукового поля в зависимости от возбуждающего напряжения проведено методом темного поля [10].

В качестве источника излучения во всех исследованиях применен He—Ne лазер с длиной волны  $\lambda=0.63$  мкм, работающий в одномодовом режиме. Расходимость излучения  $2\beta \approx 5'$ .

На рис. 1, а представлены результаты исследования переменной составляющей  $I \sim I_{\max}$  излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от частоты ультразвука. Полуширина амплитудно-частотной характеристики модулятора определяется полосой частот, пропускаемых излучателями ультразвука и составляет 5.5 МГц, как можно видеть из рис. 1, а.

Для сравнения на рис. 1, б приведена аналогичная зависимость, полученная для модуляции при дифракции на стоячей УЗ волне, возбужденной в плоскопараллельном образце молибдата свинца. В этом случае наблюдаются повторяющиеся максимумы и минимумы в пределах полосы частот излучателя ультразвука. Полуширина отдельного резонанса составляет 240 кГц, т. е. значительно меньше полуширины характеристики в случае двух встречных пространственно разнесенных бегущих УЗ волн, что соответствует сделанному выше предположению.

С изменением температуры при постоянной частоте ультразвука в случае дифракции на стоячей УЗ волне наблюдается периодическое чередование максимумов и минимумов переменной составляющей модулированного излучения. Это чередование вызывается периодическим восстановлением и нарушением условия резонанса УЗ колебаний в образце вследствие зависимости скорости ультразвука от температуры. Из сравнения полуширин резонансов частотной и температурной зависимостей переменной составляющей излучения найдена величина температурного коэффициента частоты ТКЧ =  $-5.4$  кГц/°С. Это значение позволяет сопоставить шкале частот шкалу температур на рис. 1. Жирной линией отмечен диапазон температур  $23 \div 90^\circ$  С, выбранный для исследования. Экспериментальные значения переменной составляющей излучения в зависимости от температуры АО элемента обозначены 2 и 1 соответственно для стоячей либо двух бегущих УЗ волн. Приведены наиболее характерные точки с кривых, зафиксированных самописцем. Из сравнения этих зависимостей можно сделать вывод, что в случае двух встречных пространственно разнесенных бегущих УЗ волн модуляционные характеристики сохраняются постоянными с ошибкой не более 10% относительно точки с максимальным значением переменной составляющей при изменении температуры не менее чем на  $45^\circ$  С. Соответствующее изменение температуры в случае стоячей УЗ волны составляет  $+12^\circ$  С, т. е. значительно меньше, чем отвечает теоретическому анализу. Из рис. 1 можно видеть, что температурные исследования позволяют определить форму резонансной кривой в области минимума переменной составляющей излучения, тогда как с помощью примененной электронной схемы записи амплитудно-частотных характеристик эта область остается недостаточно разрешенной.

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования глубины модуляции  $m$  (кривая б) и постоянной составляющей  $I_0/I_{0 \max}$  (кривая а) излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от напряжения  $U$  на модуляторе. Как следует из рис. 2, а, б, на частоте ультразвука  $f=26$  МГц при возбуждающем напряжении  $U=14$  в достигается уменьшение интенсивности излучения в нулевом дифракционном максимуме до  $\sim 10\%$ . Глубина модуляции с частотой  $2f=52$  МГц равна 20%. Каждая ячейка в отдельности характеризуется зависимостью постоянной составляющей  $I_0/I_{0 \max}$  от напряжения, представленной на рис. 2, г, д, откуда можно видеть, что эффективности ячеек различны. Предполагая линейную зависимость амплитуды изменения показателя преломления в УЗ волне от напряжения, находим  $q=0.5$ . Различие характеристик ячеек может быть связано с неидентичностью АО связок, с разбросом оптических, термооптических и АО свойств, а также — направлений кристаллографических осей по длине и сечению кристаллов. Интер-



ферометрические исследования примененных кристаллов показали, что их неоднородность по показателю преломления достигает  $10^{-5} \div 10^{-4}$ . Схема модулятора обеспечивает противоположное направление термических градиентов показателя преломления, однако их влияние на проходящее излучение полностью не компенсируется, что говорит о различной теплопроводности кристаллов.

Из сравнения экспериментальной зависимости рис. 2, б с зависимостью, рассчитанной по (1) и представленной кривой рис. 2, в, можно видеть, что экспериментальные значения глубины модуляции  $m$  в несколько раз меньше расчетных. Привязка шкалы напряжения к значениям параметра  $v$  осуществлена на основе сопоставления экспериментальной кривой рис. 2, г с теоретической зависимостью для дифракции на бегущей ультразвуковой волне [10]. Расчет проведен для следующих значений параметров:  $q=0.5$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = \beta/n_m$ ,  $n_m = 2.38$  — показатель преломления моли-

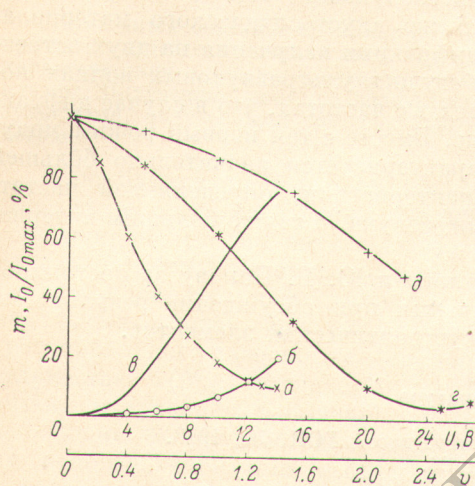


Рис. 2. Глубина модуляции  $m$  с удвоенной частотой ультразвука и постоянная составляющая  $I_0/I_{0\max}$  излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от напряжения на частоте 26 МГц.

Модулятор, собранный по схеме рис. 1: а —  $I_0/I_{0\max}$ , б —  $m$  — эксперимент, в —  $m$  — расчет по (1); отдельные ячейки модулятора: г, д —  $I_0/I_{0\max}$  — эксперимент.

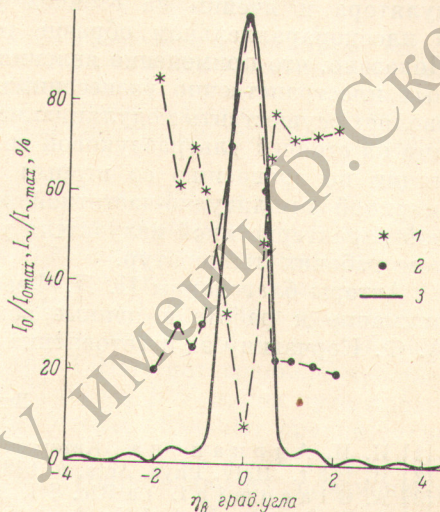


Рис. 3. Переменная  $I~/I_{\sim\max}$  и постоянная  $I_0/I_{0\max}$  составляющие излучения в нулевом дифракционном максимуме в зависимости от угла падения излучения относительно фронта ультразвуковой волны.

1 —  $I_0/I_{0\max}$ , 2 —  $I~/I_{\sim\max}$  (эксперимент), 3 —  $m/m_{\max}$  (расчет по (1)).

бдата свинца,  $l=20$  мм,  $\Lambda=0.146$  мм,  $V=3.75 \cdot 10^6$  мм/с ( $f=26$  МГц),  $\lambda=0.63$  мкм, соответствующих экспериментальным условиям.

Наблюдаемое расхождение расчета с экспериментом можно, по-видимому, связать с тем, что примененная теоретическая модель явления не учитывает реально существующей неоднородности распределения амплитуды и фазы в суммарном ультразвуковом поле двух бегущих УЗ волн. Если принять эту точку зрения, то при уменьшении диаметра луча можно ожидать снижения неоднородности фазовой модуляции по его сечению и соответственно увеличения глубины модуляции, что практически и наблюдается. Экспериментальные кривые рис. 2 получены при сечении модулируемого луча, меньшем диаметра светового окна модулятора.

На рис. 3 даны экспериментальные зависимости переменной составляющей  $I~/I_{\sim\max}$  с удвоенной частотой ультразвука и постоянной составляющей  $I_0/I_{0\max}$  излучения нулевого дифракционного максимума от угла падения к фронту ультразвуковой волны. Там же приведена зависимость, рассчитанная по (1) для значений параметров, соответствующих рис. 2, в, и  $\eta_1 = \eta_2 = \eta_b/n_m$ .

Из рис. 3 видно, что уменьшение глубины модуляции на 10% соответствует в согласии с расчетом увеличению угла падения на  $\pm 15'$  от нулевого



значения. Допустимую расходимость модулируемого излучения можно оценить соответственно величиной  $\sim 30'$ . Непараллельность фронтов ультразвуковых волн, вызываемая перекосом ячеек, приводит в согласии с (1) к уменьшению глубины модуляции.

Таким образом, в настоящей работе получены следующие основные результаты. Получены достаточно однородные монокристаллы молибдата свинца, характеризующиеся высокой прозрачностью в области  $0.39 \pm 5.5$  мкм, неоднородностью показателя преломления порядка  $10^{-4}$  и коэффициентом тиндалевского рассеяния  $10^{-5}$  см $^{-1}$ . Разработан и исследован макет дифракционного модулятора на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых волнах в молибдате свинца. На частоте 52 МГц глубина модуляции излучения с длиной волны  $\lambda = 0.63$  мкм равна  $m = 20\%$  при управляющем напряжении 14 в. Проведены сравнительные исследования модуляционных характеристик разработанного модулятора и ячейки на стоячей ультразвуковой волне, возбужденной в плоскопараллельном образце того же акустооптического материала. Показано, что применение явления дифракции излучения на двух встречных пространственно разнесенных бегущих ультразвуковых волнах позволяет осуществить модуляцию на тех же частотах, что в случае дифракции на стоячей ультразвуковой волне. Вместе с тем первый режим модуляции по сравнению со вторым характеризуется значительно большей шириной амплитудно-частотной характеристики, определяемой частотной характеристикой излучателя ультразвука, а также большим интервалом рабочих температур.

Авторы благодарны П. П. Феофилову и Ю. В. Попову за постоянное внимание к работе и ценные замечания при обсуждении результатов, А. Ф. Корчагину за изготовление акустооптических элементов.

#### Литература

- [1] И. И. Адрианова. Автореф. канд. дисс., ГОИ, Л., 1963.
- [2] R. Vög. *Helv. Phys. Acta*, *9*, 678, 1936.
- [3] A. Giacomini. *La Ric. Sci.*, *18*, 803, 1948.
- [4] B. D. Cook, E. A. Hiedemann. *J. Opt. Soc. Am.*, *33*, 945, 1961.
- [5] С. М. Рытов. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, *2*, 222, 1937.
- [6] R. Segard. *Compt. rend.*, *262*, B, 1498, 1966.
- [7] D. A. Ripnow. *IEEE, QE-6*, 223, 1970.
- [8] М. Я. Кругер, В. А. Панов, В. В. Кулагин, Г. В. Погарев, Я. М. Кругер, А. М. Левинзон. *Справочник конструктора опто-механических приборов*. Изд. «Машиностроение», Л., 1967.
- [9] И. И. Адрианова, Н. А. Бродович, Ю. В. Попов, В. Е. Терентьев. *Опт. и спектр.*, *32*, 1222, 1972.
- [10] Л. Бергман. *Ультразвук и его применение в науке и технике*. ИЛ, 1957.

Поступило в Редакцию 10 октября 1974 г.