

Расширение углового диапазона сканирования акустооптического дефлектора с двухэлементным фазированным пьезопреобразователем

© С.Н. Антонов,¹ А.В. Вайнер,¹ В.В. Проклов,¹ Ю.Г. Резвов²

¹ Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, Московская область, Россия

² Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, 301665 Новомосковск, Тульская область, Россия
e-mail: v-nr@ya.ru

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2012 г.)

Исследован акустооптический дефлектор с двухэлементным фазированным пьезопреобразователем при эффективности дифракции, близкой к предельной. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено явление значительного расширения рабочей полосы звуковых частот (и углового диапазона сканирования) относительно хорошо изученного режима малой эффективности. Для неаксиального дефлектора на основе парателлуриата (TeO_2), излучения с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$ и двухэлементного преобразователя суммарной длиной 6 mm полоса частот составила $17\text{--}48 \text{ MHz}$ (нижняя частота определялась электромеханическими свойствами преобразователя) при эффективности не менее 94% от максимальной.

Введение

Для увеличения углового диапазона сканирования (который пропорционален ширине полосы звуковых частот) и уменьшения потребляемой акустической мощности в акустооптических (АО) дефлекторах применяются многоэлементные пьезопреобразователи. При этом целый преобразователь заменяется набором элементов, которые возбуждают акустические волны одной частоты, но с определенным сдвигом фаз. Это позволяет отклонять основной лепесток диаграммы направленности акустического поля и поддерживать брэгговский синхронизм АО-взаимодействия в большей полосе звуковых частот. Известны различные способы получения и управления этим сдвигом фаз: противофазным включением соседних элементов [1], установкой элементов на „ступеньки“, выточенные в кристалле, в котором происходит АО-взаимодействие [2], и, наконец, путем сдвига фаз управляющих электрических сигналов [3], что дает максимальные результаты.

Хотя эта идея была описана еще в 60-х годах прошлого века, она исследована почти исключительно в режиме слабого АО-взаимодействия, линейного по мощности звука. Основной вывод этих исследований заключается в том, что при оптимальном фазировании N -элементный преобразователь позволяет достичь такой же ширины частотной полосы, как целый преобразователь размером с один элемент. В настоящей работе показано, что в работе многоэлементного преобразователя в режиме максимальной эффективности дифракции (приближающейся к 100%) проявляются существенные отличия от линейного режима. В частности, при использовании двух элементов полоса по высокому уровню эффективности ($\sim 90\%$) соответствует не одному элементу, а половине элемента. То есть при изотропной АО-дифракции

(когда полоса обратно пропорциональна длине взаимодействия) разделение преобразователя на две части увеличивает полосу не в два, а в четыре раза.

Актуальность данного исследования связана с тем, что одно из важных применений АО-устройств — управление мощными лазерами в системах обработки материалов — требует максимально высокую и постоянную эффективность дифракции во всей рабочей полосе. Вторым важным фактором является развитие электронной базы. Оно сделало доступными многоканальные генераторы управляющих сигналов с произвольными программируемыми сдвигами фаз между каналами, которые необходимы для многоэлементных АО-дефлекторов.

1. Основные уравнения

При анализе АО-дифракции на неоднородном акустическом поле (в частности, поле многоэлементного преобразователя) часто ограничиваются рассмотрением углового спектра поля, считая эффективность дифракции пропорциональной мощности соответствующей угловой компоненты. Однако этот подход справедлив лишь при низкой эффективности дифракции — не более 10–30%.

Рассмотрим дифракцию на акустическом поле, состоящем из отдельных слоев, генерируемых разными элементами преобразователя (рис. 1). Параметры акустических волн: L — толщина слоя вдоль направления распространения света (оси z), ν — параметр Рамана–Ната (индекс фазовой модуляции), φ — начальная фаза. Индексами 1 и 2 обозначено, к которому акустическому слою относятся эти величины. \mathbf{k}_i — волновой вектор исходного светового луча, \mathbf{k}_d — дифрагированного, \mathbf{K} — центральный волновой вектор акустической волны. В пределах каждого слоя будем считать акустическое

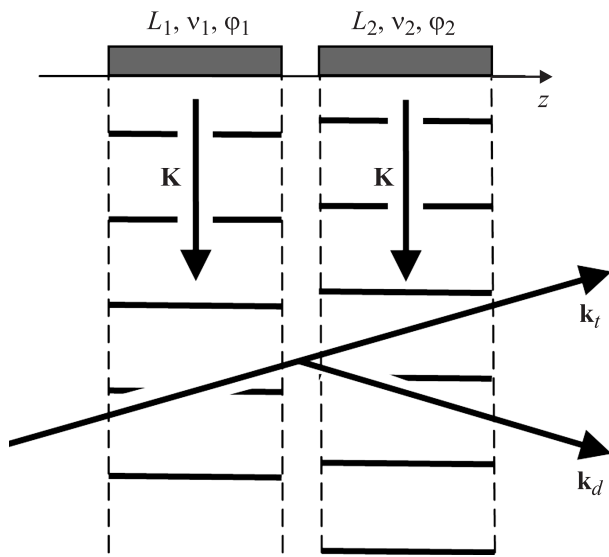


Рис. 1. АО-дифракция на поле двухэлементного пьезопреобразователя.

поле однородным. Классические уравнения связанных волн, описывающие АО-дифракцию, имеют вид

$$\begin{cases} C'_t = -\frac{\nu}{2L} \exp(-j\varphi - j\chi z) C_d, \\ C'_d = \frac{\nu}{2L} \exp(j\varphi + j\chi z) C_t. \end{cases}$$

Здесь $C_{t,d}(z)$ — комплексные амплитуды дифракционных порядков, штрих обозначает дифференцирование по z , χ — расстройка брэгговского синхронизма, которая определяется несовпадением волновых векторов:

$$\chi = [\mathbf{k}_d - \mathbf{k}_t - \mathbf{K}]_z. \quad (1)$$

Индекс z обозначает компоненту вектора вдоль оси z .

Чтобы описать дифракцию на всем (двуслойном) акустическом поле, нам потребуется решить задачу для первого слоя, получив комплексные амплитуды дифракционных порядков на выходе из него, затем пересчитать их во входные амплитуды второго слоя и решить задачу для него. В такой формулировке фазы световых волн отсчитываются от места входа светового луча в очередной слой, и процедура пересчета неудобна. Решение становится проще, если аналогично [4] перейти к другим обозначениям комплексных амплитуд дифракционных порядков, а именно представить оптическое поле в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = & \mathbf{e}_t C_t(z) \exp\left(j\omega t - j\mathbf{k}_t \mathbf{r} - j\frac{\chi}{2} z\right) \\ & + \mathbf{e}_d C_d(z) \exp\left(j\omega t + j2\pi f t - j\mathbf{k}_d \mathbf{r} + j\frac{\chi}{2} z\right). \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{e}_{t,d}$ — единичные векторы поляризации, ω — частота исходного излучения, f — частота звука. Благодаря слагаемым $\pm j(\chi/2)z$ в показателях экспонент фазовые соотношения, влияющие на АО-взаимодействие, в

каждой точке определяются фазами комплексных амплитуд света и фазой акустической волны в той же точке, т.е. никаких точек отсчета фаз не требуется.

Уравнения связанных волн принимают вид

$$\begin{cases} C'_t = j\frac{\chi}{2} C_t - \frac{\nu}{2L} \exp(-j\varphi) C_d \\ C'_d = \frac{\nu}{2L} \exp(j\varphi) C_t - j\frac{\chi}{2} C_d. \end{cases}$$

Решение представляется в виде матрицы, связывающей комплексные амплитуды на входе и на выходе акустического слоя

$$\begin{pmatrix} C_t(z+L) \\ C_d(z+L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T & -D^* \\ D & T^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_t(z) \\ C_d(z) \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} T = & \cos\left(\sqrt{\left(\frac{\nu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\chi L}{2}\right)^2}\right) \\ & + j\frac{\chi L}{2} \operatorname{sinc}\left(\sqrt{\left(\frac{\nu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\chi L}{2}\right)^2}\right), \end{aligned}$$

$$D = \frac{\nu}{2} \operatorname{sinc}\left(\sqrt{\left(\frac{\nu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\chi L}{2}\right)^2}\right) \exp(j\varphi).$$

где $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

Результат последовательного прохождения светом нескольких слоев описывается простым перемножением матриц каждого из этих слоев. Введем эффективность дифракции в i -м слое η_i и дополнительный фазовый набег нулевого порядка ψ_i [5]:

$$T_i = \sqrt{1 - \eta_i} \exp\left(j\frac{\chi_i L_i}{2} + j\psi_i\right),$$

$$D_i = \sqrt{\eta_i} \exp(j\varphi_i).$$

Наша система состоит из трех слоев — акустических полей двух элементов преобразователя и зазора между ними, не заполненного звуком. Перемножая матрицы и используя начальное условие — на входе в систему присутствует только нулевой порядок света, — найдем интегральную эффективность дифракции

$$\begin{aligned} \eta_{\text{fin}} = & \eta_1(1 - \eta_2) + \eta_2(1 - \eta_1) \\ & + 2\sqrt{\eta_1 \eta_2 (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)} \cos(\Phi), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\Phi = \varphi_2 - \varphi_1 + \psi_1 + \psi_2 + \chi\left(\frac{L_1 + L_2}{2} + d\right). \quad (3)$$

Здесь d — толщина зазора между элементами. Если зазор отсутствует, а сами элементы идентичны (имеют одинаковый размер и акустическую амплитуду), то

$$\begin{aligned} \eta_{\text{fin}} = & 2\eta(1 - \eta)[1 + \cos(\Phi)], \\ \Phi = & \varphi_2 - \varphi_1 + 2\psi + \chi L. \end{aligned} \quad (4)$$

2. Угловой диапазон сканирования

Чем больше произведение расстройки на длину взаимодействия, тем ниже эффективность АО-взаимодействия. Для увеличения эффективности и расширения частотной полосы, во-первых, выбирают такую геометрию АО-дифракции, в которой разность волновых векторов в (1) остается малой в максимально большом диапазоне частот. Во-вторых, уменьшают длину взаимодействия. Однако управляющая мощность, необходимая для достижения заданного уровня эффективности, обратно пропорциональна длине преобразователя, и поэтому (а также и по другим причинам [6]) уменьшение длины взаимодействия имеет предел.

Рассмотрим двухэлементный преобразователь с идентичными элементами и без зазора между ними (4). В синфазном режиме работы элементов (или в случае единого преобразователя) $\Phi = 2\psi + \chi L$. По мере удаления частоты звука от условия точного синхронизма нарастает расстройка χ , а вместе с ней и дополнительный набег фазы ψ , в результате чего суммарная эффективность снижается. Вторая причина снижения выходной эффективности — уменьшение η (также вследствие расстройки). Однако это уменьшение происходит существенно медленней.

Если, управляя разностью фаз элементов $\varphi_2 - \varphi_1$, при всех частотах поддерживать $\Phi = 0$, то суммарная эффективность будет равна

$$\eta_{\text{fin}}(\Phi = 0) = \eta_{\text{opt}} = 4\eta(1 - \eta). \quad (5)$$

Индекс „opt“ обозначает оптимальный сдвиг фаз между элементами.

Несмотря на простоту, формула (5) — центральный момент настоящей работы. Рассмотрим эту зависимость (рис. 2). Во-первых, максимум интегральной эффективности, равный 100%, достигается при $\eta = 50\%$. Во-вторых, эффективность остается высокой в большом диапазоне значений η — она падает на 5%, лишь

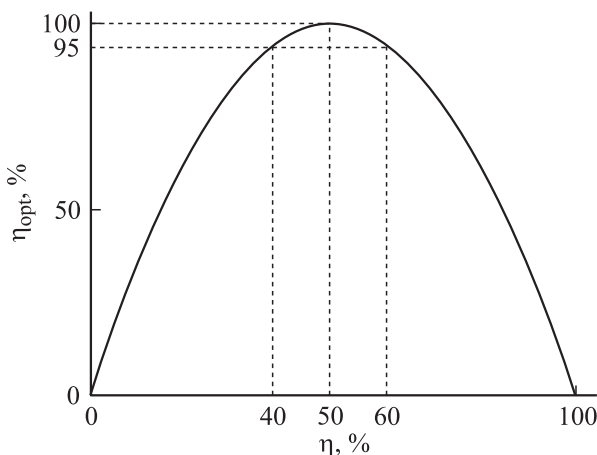


Рис. 2. Зависимость интегральной эффективности от эффективности дифракции на одном акустическом слое при оптимальном сдвиге фаз.

когда η уменьшается до 40%. Это означает, что, пока расстройка синхронизма и ограничение управляющей мощности позволяют получить хотя бы 40% эффективности дифракции на каждой половине акустического поля в отдельности, интегральная эффективность будет не ниже 95%. Это позволяет существенно увеличить частотную полосу.

Ее ширину по высокому уровню можно оценить, разложив эффективность в ряд по расстройке до первых двух членов. Эффективность не зависит от знака расстройки, поэтому ряд состоит только из четных степеней

$$\frac{\eta}{I} = 1 - A \left(\frac{\chi L}{2} \right)^2 + B \left(\frac{\chi L}{2} \right)^4 + O(\chi^6).$$

Здесь I — эффективность при отсутствии расстройки. Коэффициенты A и B в зависимости от I принимают значения в диапазонах 0.33–0.4 и 0.045–0.065 соответственно.

В синфазном режиме система из двух элементов тождественна одному преобразователю вдвое большего размера, поэтому

$$\frac{\eta_{\text{syn}}}{I_{\text{syn}}} = 1 - A_2(\chi L)^2 + B_2(\chi L)^4 + O(\chi^6). \quad (6)$$

Индекс „2“ у коэффициентов A и B обозначает, что они относятся к эффективности, получаемой на всем преобразователе, а не на одном его элементе.

Будем определять частотную полосу по уровню γ от выбранной максимальной эффективности

$$\eta_{\text{fin}} \geq \gamma I_{\text{fin}}.$$

Если γ больше 50%, то в (6) можно ограничиться квадратичным членом. Таким образом, для того чтобы эффективность не падала ниже заданного уровня, модуль расстройки не должен превышать следующей величины:

$$|\chi| \leq \chi_{\text{sym}} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{1-\gamma}{A_2}}.$$

В режиме оптимального сдвига фаз

$$\begin{aligned} \frac{\eta_{\text{opt}}}{I_{\text{opt}}} = & 1 - \frac{1-2I}{1-I} A_1 \left(\frac{\chi L}{2} \right)^2 + \left[\frac{1-2I}{1-I} B_1 \left(\frac{\chi L}{2} \right)^4 \right. \\ & \left. - \frac{I}{1-I} A_1^2 \right] \left(\frac{\chi L}{2} \right)^4 + O(\chi^6). \end{aligned}$$

При малой эффективности дифракции ($I \ll 1$) достаточно ограничиться квадратичным членом

$$\frac{\eta_{\text{opt}}}{I_{\text{opt}}} = 1 - A_1 \left(\frac{\chi L}{2} \right)^2 + O(\chi^4),$$

$$|\chi| \leq \chi_{\text{low}} = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{1-\gamma}{A_1}}.$$

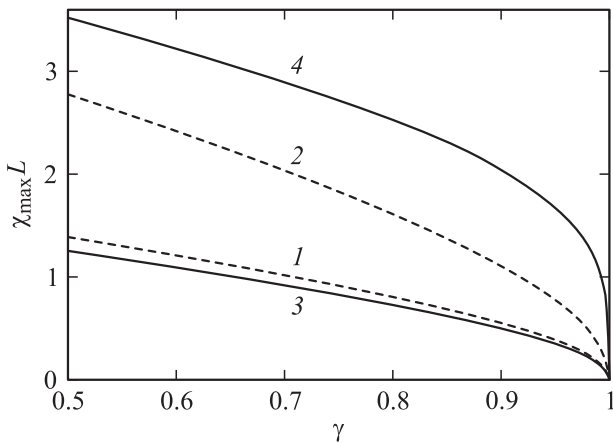


Рис. 3. Предельная допустимая расстройка синхронизма. Низкая эффективность: 1 — синфазный режим, 2 — оптимальный сдвиг фаз. Высокая эффективность: 3 — синфазный режим, 4 — оптимальный сдвиг фаз.

При малой эффективности разница между A_1 и A_2 незначительна, т.е. оптимальный сдвиг фаз между элементами преобразователя увеличивает допустимую расстройку синхронизма в 2 раза — известный результат.

Теперь рассмотрим режим дифракции с максимальной эффективностью, т.е. $I = 50\%$. При этом квадратичный член ряда обращается в нуль

$$\frac{\eta_{opt}}{I_{opt}} = 1 - A_1^2 \left(\frac{\chi L}{2}\right)^4 + O(\chi)^6,$$

$$|\chi| \leq \chi_{high} = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{\sqrt{1-\gamma}}{A_1}} = \frac{\chi_{low}}{\sqrt[4]{1-\gamma}}.$$

Таким образом, допустимая расстройка при максимальной эффективности в $(1-\gamma)^{-1/4}$ больше, чем в режиме низкой эффективности. Точный численный расчет предельно допустимой расстройки представлен на рис. 3. Штриховые кривые соответствуют режиму малой эффективности, сплошные — высокой (предельной). Разница между синфазными режимами (кривые 1 и 3) невелика и соответствует диапазону изменения коэффициента A_1 . Разница же между режимами оптимального сдвига фаз существенна и тем больше, чем выше γ . Если определять полосу по уровню эффективности 0.5 (от выбранной максимальной эффективности), то допустимая расстройка при сильном взаимодействии на 25% больше, чем при малой эффективности; по уровню 0.75 — на 50%; по уровню 0.94 — в 2 раза.

Выигрыш от разделения преобразователя на два элемента определяется отношением допустимой расстройки в оптимальном и синфазном режимах (так как синфазный режим ничем не отличается от неразделенного преобразователя). В случае высокой эффективности и уровне $\gamma = 0.94$ это отношение составляет 4.5. То есть расширение частотной полосы благодаря разделению

преобразователя и оптимальным сдвигам фаз соответствует виртуальному уменьшению длины преобразователя в 4.5 раза. При изотропной АО-дифракции во столько же раз увеличится и сама полоса.

3. Влияние технологических допусков изготовления преобразователя

Оценим, как влияют на результаты (разд. 2) вероятные неидеальности изготовления и работы преобразователя, а именно

- неравенство размеров элементов,
- неравенство амплитуд излучаемых ими акустических волн,
- зазор между элементами.

Неодинаковость преобразователей (т.е. первые два пункта) приводит к различию в эффективностях дифракции на их полях. Это различие не ограничивает предельную интегральную эффективность дифракции, поскольку при оптимальном сдвиге фаз

$$\eta_{opt} = (\sqrt{\eta_1(1-\eta_2)} + \sqrt{\eta_2(1-\eta_1)})^2$$

и при $\eta_1 + \eta_2 = 1$ интегральная эффективность достигает 100%. Однако неравенство эффективностей сказывается на необходимой управляющей мощности. Зависимость эффективности от управляющей мощности имеет вид линейной (при малых эффективностях), переходящей в насыщение (при больших эффективностях), или, другими словами, имеет отрицательную вторую производную. Следовательно, при одной и той же сумме эффективностей элементов, чем больше их разница, тем больше суммарная управляющая мощность.

Зазор между элементами, во-первых, влияет на величину оптимального сдвига фаз (3). Во-вторых, он уменьшает угловую апертуру АО-взаимодействия. Предположим, сдвиг фаз между элементами выбран так, чтобы для центральной компоненты углового спектра света $\Phi = 0$. Отклоняясь от этой компоненты в ту или другую сторону, будем наблюдать возрастание $|\Phi|$ и, как следствие, снижение эффективности. Этот процесс будет идти тем быстрее, чем больше величина $(L_1 + L_2)/2 + d$, т.е. расстояние между центрами элементов.

4. Эксперимент

Для экспериментальной проверки теоретических результатов был использован дефлектор на монокристалле парателлурита (TeO_2), в котором возбуждалась медленная сдвиговая волна с волновым вектором, лежащим в плоскости $(1\bar{1}0)$ под углом 6° к направлению (110) . Пьезопреобразователь состоял из двух элементов шириной 3 mm каждый, с зазором между ними около 0.5 mm. Световое излучение вне среды имело длину волны $1.06 \mu\text{m}$ и полную расходимость 2.4 mrad .

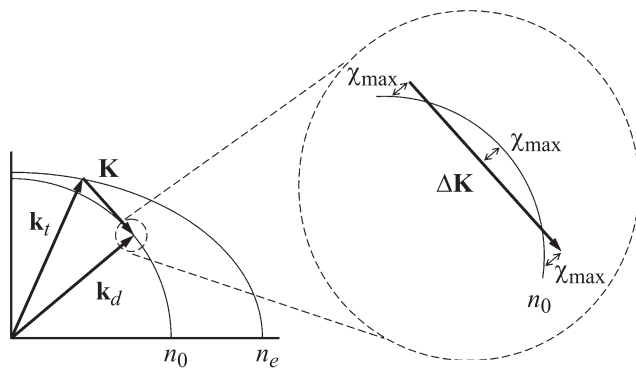


Рис. 4. Геометрия АО-взаимодействия.

Реализованная геометрия АО-взаимодействия известна как неаксиальный анизотропный дефлектор и характеризуется сменой поляризационной моды света при дифракции (рис. 4). Волновой вектор звука направлен по касательной к волновой поверхности дифрагированного света, благодаря чему синхронизм сохраняется в большой полосе частот. Зависимость эффективности от частоты имеет два максимума, поскольку точный синхронизм реализуется при двух значениях частоты. Варьируя угол падения исходного светового луча, можно выбирать компромисс между шириной полосы и глубиной снижения эффективности в центре полосы (между двумя максимумами). При заданной предельной допустимой расстройке χ_{\max} полоса составляет

$$\Delta f = V_s \frac{\Delta K}{2\pi} = V_s \sqrt{\frac{8\chi_{\max} n_0}{\pi \lambda}},$$

где V_s — скорость звука, n_0 — показатель преломления обыкновенной световой моды, λ — длина волны света в вакууме.

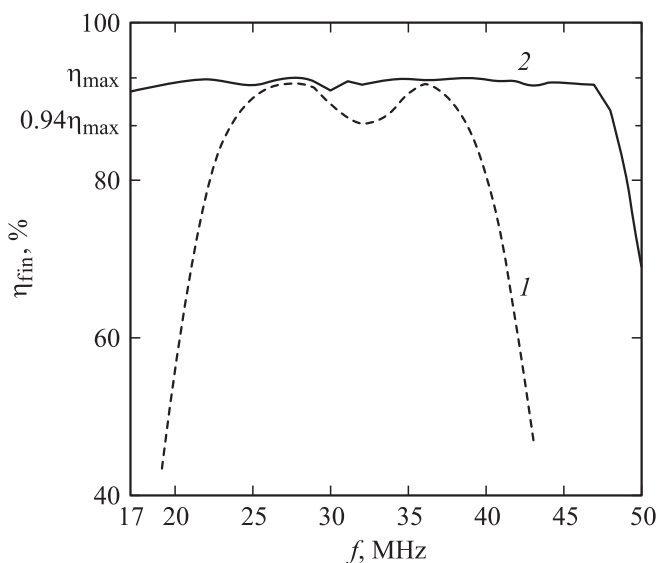


Рис. 5. Измеренные частотные зависимости эффективности дифракции.

Так как полоса пропорциональна не предельной расстройке, а корню из нее, то и расширение полосы следует ожидать не в рассчитанное в разд. 2 количество раз, а в корень из этого количества.

Измеренные зависимости эффективности дифракции от частоты приведены на рис. 5. Кривая 1 получена при синфазной работе элементов. На каждой частоте был найден максимум зависимости эффективности от управляющей мощности. Максимальная полученная эффективность была ограничена расходимостью света [6] и составила $\eta_{\max} = 95\%$. Так как эта величина мало отличается от 100%, то, по-видимому, рассуждения разд. 1–3 с достаточной точностью применимы к этому эксперименту.

В центре полосы эффективность падает до 87%, т.е. до $0.94\eta_{\max}$. Эта величина и была взята за уровень γ , по которому во всех случаях определялась полоса. Как видно из графика, в синфазном режиме полоса составила 15 МГц.

Далее сигналы на элементы преобразователя подавались при оптимальном сдвиге фаз на каждой частоте и той же управляющей мощности, при которой достигался максимум в синфазном режиме. Для увеличения полосы был изменен угол падения света. Измеренная зависимость — кривая 2 — позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, предельная эффективность, которая была ограничена угловой расходимостью света, не изменилась. Следовательно, угловая апертура дифракции в оптимальном режиме такая же (или почти такая же), как и в синфазном. Во-вторых, частотная полоса существенно увеличилась. Ограниченный частотный диапазон электрического согласования элементов преобразователя не позволил наблюдать падение эффективности на более низких частотах, т.е. точно определить нижнюю границу полосы. Однако даже в таких условиях была достигнута ширина полосы 31 МГц, что в 2 раза больше полосы в синфазном режиме. Как отмечено выше, в данной геометрии дифракции это соответствует виртуальному сокращению длины взаимодействия в 4 раза.

Полоса отдельно работавшего одного элемента составила 22 МГц (не приведена на графике), что хорошо согласуется с остальными измерениями.

Заключение

Обнаружено, что при эффективности дифракции, близкой к предельной, расширение частотного диапазона АО-взаимодействия вследствие использования оптимально фазированного двухэлементного пьезопреобразователя существенно больше, чем в режиме слабого взаимодействия. В частности, ширина частотного диапазона по уровню 0.94 от максимальной эффективности соответствует 1/4.5 размера целого преобразователя, а не половинному размеру, как при слабом взаимодействии. При этом потребляемая управляющая мощность

не меняется и соответствует целому, не разделенному на элементы преобразователю.

Проведена экспериментальная проверка теоретических положений на основе неаксиального АО-дефлектора из монокристалла парателлурита. В этой геометрии частотный диапазон обратно пропорционален не размеру преобразователя (как при изотропной дифракции), а корню из этого размера, поэтому виртуальное сокращение размера в 4.5 раза вызвало бы увеличение полосы в 2.1 раза. Из-за ограниченности диапазона электрического согласования использованного преобразователя удалось реализовать увеличение полосы лишь в 2 раза. Достигнутая полоса в 1.5 раза больше полосы, получаемой при использовании только одного элемента преобразователя, что эквивалентно использованию целого преобразователя, но в 4 раза меньшей длины. При этом потребляемая управляющая мощность не изменилась.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 10-02-00029-а и 12-07-00186-а.

Список литературы

- [1] *Gordon E. I.* // *Appl. Opt.* 1966. Vol. 5. N 10. P. 1629–1639.
- [2] *Voshol C.P.L., Spiekerman A.J.G.* // *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics.* 1975. Vol. 22. N 2. P. 143.
- [3] *Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J.L.* // *J. Opt. A.: Pure Appl. Opt.* 2007. Vol. 9. P. 463–469.
- [4] *Pieper R.J., Korpel A.* // *Appl. Opt.* 1983. Vol. 22. N 24. P. 4073–4081.
- [5] *Зильберман Г.Е., Купченко Л.Ф., Антонов С.Н., Гуляев Ю.В., Проклов В.В.* // Препринт ИРЭ АН СССР № 28 (400). 1984.
- [6] *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 111 с.