

01;07;08;12

Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным аподизированным пьезопреобразователем

© Д.П. Волик, В.В. Роздобудько

Южный федеральный университет
Технологический институт Южного федерального университета,
347922 Таганрог, Россия
e-mail: dvlbest@mail.ru

(Поступило в Редакцию 12 марта 2008 г. В окончательной редакции 24 июля 2008 г.)

Для дефлектора с поверхностным многоэлементным преобразователем, выполненным с изменяющейся длиной акустооптического взаимодействия, теоретически и экспериментально проанализировано поведение его амплитудно-частотных характеристик, получающихся при различных углах падения света на возбуждаемый преобразователем ультразвуковой столб.

PACS: 42.79.J

Введение

Акустооптические дефлекторы (АОД) являются основными элементами целого ряда измерителей радиотехнического назначения — частотомеров, спектроанализаторов, корреляторов, демодуляторов частотно- и фазомодулированных сигналов; параметрами АОД определяются основные характеристики перечисленных устройств.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) АОД представляет собой зависимость интенсивности дифрагированного света I_d от частоты f входного радиосигнала $I_d = \varphi(f)$ или в нормированном виде $\xi = I_d/I_0 = \varphi(f)$, где ξ — дифракционная эффективность, а I_0 — интенсивность падающего на АОД лазерного излучения. По заданному уровню неравномерности АЧХ из $\xi = \varphi(f)$ следует полоса рабочих частот АОД — Δf_{Σ} .

В обычном случае, если пьезопреобразователь АОД выполнен в виде прямоугольника сечением $l \times d$ (рис. 1, а), где l — длина акустооптического (АО) взаимодействия, в котором обеспечивается равномерное распределение ультразвуковой мощности по всей площади, АЧХ АОД как результат соответствующего фурье-преобразования прямоугольной функции возбуждения описывается соотношением вида $\xi \sim \text{sinc}^2(x)$, имеющим, как известно, боковые лепестки и соответственно паразитные полосы пропускания, уровень первых из которых составляет $\sim 4.5\%$.

Паразитные полосы пропускания лежат вне Δf_{Σ} , но при работе АОД в многосигнальном режиме их наличие сужает динамический диапазон перечисленных выше измерителей параметров радиосигналов. Поэтому задача уменьшения боковых лепестков АЧХ АОД и подавления паразитных полос приема сигналов в акустооптических приемниках-частотомерах и других АО-измерителях является актуальной.

В общетехническом плане способ уменьшения интенсивности боковых лепестков широко известен: он за-

ключается в уменьшении по тому или иному закону уровня возбуждаемой ультразвуковой мощности к краям апертуры l — протяженности раскрыва пьезопреобразователя.

Однако в каждом конкретном случае, в каждом техническом приложении имеется своя специфика этого известного способа [1–3].

В настоящей работе результаты [1–3] распространены на случай СВЧ многоэлементных АОД, в теле которых ультразвуковые объемные волны возбуждаются с поверхности пьезоэлектрического кристалла противофазной системой электродов типа встречно-штыревых (ВШП) [4]. Показано, что при аподизации ВШП наблюдается расширение АЧХ АОД и подавление боковых полос пропускания, причем тем большее, чем более значительным является спадание уровня возбуждаемой мощности к краям апертуры АОД. Сказанное имеет место при падении света на АОД как под углом, близким к энергетически оптимальному, когда наблюдаются одnogорбые АЧХ, так и под углом, при котором реализуются двугорбые АЧХ [5]. При этом обнаружено, что в последнем случае наряду с уменьшением дифракционной эффективности, подавлением паразитных полос и расширением АЧХ наблюдается уменьшение неравномерности дифракционной эффективности в полосе рабочих частот, что, по-видимому, ранее не отмечалось. Данное явление может быть использовано в прикладных целях; более того, для СВЧ широкополосных АОД оно является более значимым, чем факт подавления его боковых полос пропускания.

Теоретический анализ

Для типичной геометрии АО-взаимодействия (рис. 1, а), когда ультразвук в АОД генерируется пьезопреобразователем прямоугольной формы d , а падающее световое излучение с амплитудой E_i и

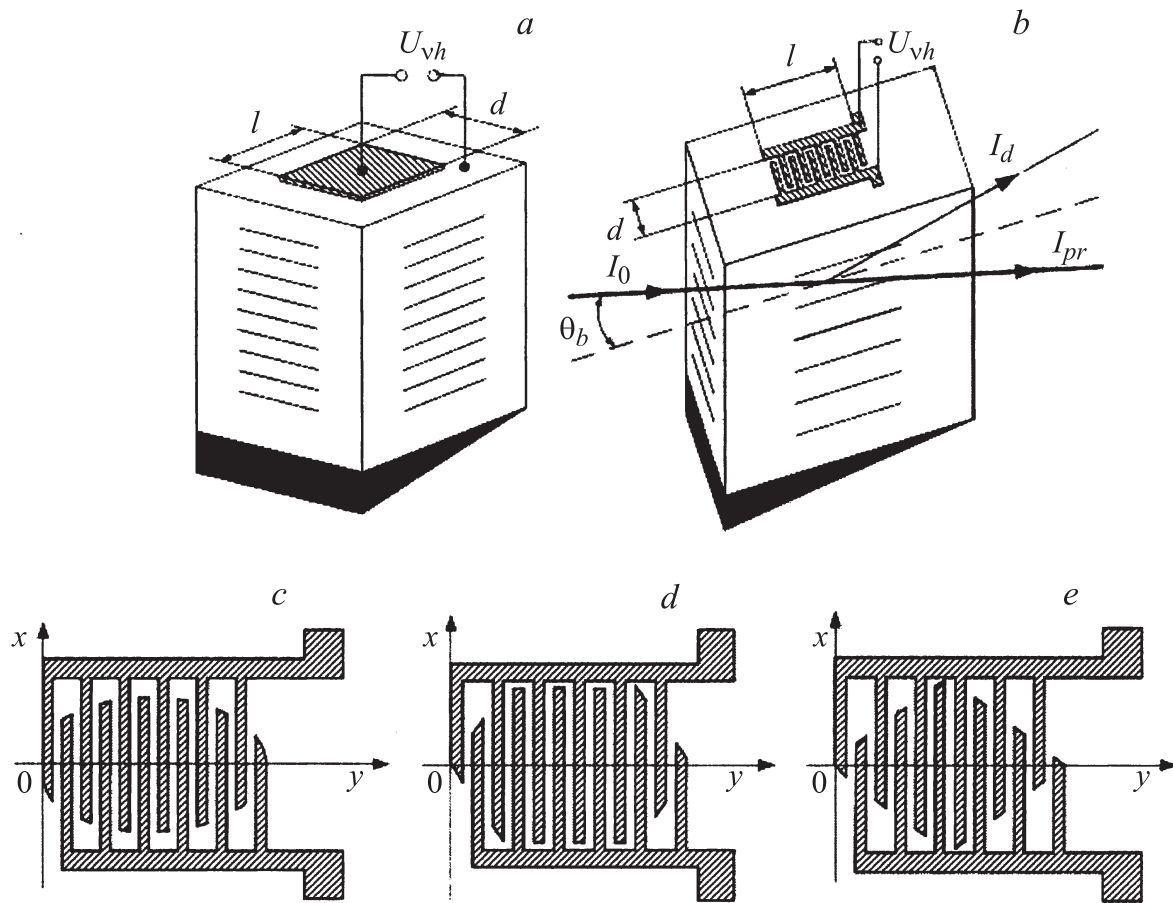


Рис. 1. АОД: *a* — с пластинчатым преобразователем; *b* — с решеткой преобразователя; *c, e* — возможные конфигурации многоэлементных преобразователей, выполненных в виде противофазно-возбуждаемых электродов.

длиной волны λ считается плоским, система уравнений, описывающая АО-взаимодействие и связывающая амплитуды прошедшего E_t и дифрагированного E_d света, имеет вид [1–3,5]

$$\frac{dE_t}{dx} = -\frac{q}{2} E_d(x) e^{-jn x}, \quad \frac{dE_d}{dx} = \frac{q}{2} E_t(x) e^{jn x},$$

$$q = \frac{\pi}{\lambda \cos \theta_0} \sqrt{\frac{M_2 P_a}{2S}}, \quad (1)$$

где q — коэффициент АО-взаимодействия, зависящий от длины волны света λ , угла его падения θ_0 на ультразвуковой столб площадью $S = ld$, коэффициент АО-качества светозвукопровода M_2 и акустической мощности P_a входного радиосигнала P_{vh} ; $P_a = k P_{vh}$, k — коэффициент преобразования; η — параметр расстройки; его зависимость от частоты входного сигнала может быть представлена в виде [5]

$$\eta = K(\theta_0 - \theta_b), \quad K = 2\pi/\Lambda, \quad \theta_b = -\frac{\lambda f}{2nv}.$$

Решение системы уравнений (1) при граничных условиях $E_d(0) = 0$, $E_t(0) = E_i$ может быть представлено

$$E_d(l) = e^{jn l/2} \frac{q E_i}{\sqrt{q^2 + \eta^2}} \sin\left(\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2}\right),$$

$$E_t(l) = e^{jn l/2} q E_i \left[\cos\left(\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2}\right) + \frac{j\eta}{\sqrt{q^2 + \eta^2}} \times \sin\left(\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2}\right) \right]. \quad (2)$$

Записав выражение для интенсивности дифрагированного света на выходе АОД $I_d = E_d(l) E_d^*(l)$, для его нормированной АЧХ соотношение (2) можно представить в известной форме

$$\xi(F) = \frac{q^2}{\sqrt{q^2 + \eta^2}} \sin^2\left(\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2}\right)$$

или, ограничившись линейным режимом дифракции, в форме

$$\xi(F) = \left(\frac{ql}{2}\right)^2 \text{sinc}^2\left[\frac{\lambda f_0^2 l}{2nv^2} F(1 + F)\right],$$

где

$$\text{sinc}[\bullet] = \frac{\sin(\pi[\bullet])}{\pi[\bullet]},$$

$$F = \frac{f - f_0}{f_0}$$

— нормированная частота, причем f_0 выбрана из условия равенства угла θ_0 углу Брэгга θ_b , т.е. $|\theta_0| = |\theta_b(f_0)|$.

Аналогичный вид имеет соотношение для АЧХ многоэлементного АОД (рис. 1, б). Если пьезопреобразователь такого АОД содержит m элементов протяженностью l_0 и шириной d , период расположения которых s , то выражение для АЧХ может быть записано в виде [4]

$$\xi(F) = \left(\frac{q_0 m l_0}{2}\right)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{l_0}{2s}\right) \times \text{sinc}^2\left(\frac{\lambda m s f_0^2}{2n v^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1]\right), \quad (3)$$

в котором Θ_0 , в данном случае нормированный к $|\theta_b(f_0)|$, — угол падения света, а f_0 выбрана из условия наилучшей коррекции брэгговского угла: $f_0 = v\sqrt{n/\lambda s}$; кроме того, входящий в (3) параметр

$$q_0 = (\pi/\lambda \cos(\theta_0)) \sqrt{M_2 P_{a0}/2S}$$

содержит в себе P_{a0} — звуковую мощность, излучаемую решеткой преобразователей, площадь излучения которой $S = d m l_0$. Отметим, что в данном случае в качестве элемента решетки ВШП выступает поверхность между металлическими электродами; при числе электродов, равном N , число собственно пьезопреобразователей будет $m = N - 1$.

Формула (3) примечательна тем, что в ней селективность процесса АО-взаимодействия зависит от полной протяженности по свету $L \approx m s$ решетки преобразователей, а его эффективность определяется суммарной длиной $m l_0$ преобразователей [5].

И в случае единичного преобразователя (рис. 1, а), и для решетки преобразователей (рис. 1, б) с сечением ld или msd соответственно на центральной рабочей частоте f_0 , когда $\eta = 0$, максимальная эффективность дифракции имеет место при $ql = \pi$ или при $q_0 m s = \pi$. Условия $ql = \pi$ и $q_0 m s = \pi$ являются общими для всех парциальных компонент света в сечении лазерного луча, поскольку длина взаимодействия для всех оптических компонент одинакова [1].

Иная картина дифракции наблюдается в том случае, когда решетка преобразователей возбуждается в светозвукопроводе АОД акустический столб, имеющий сечение, отличающееся от прямоугольного. На рис. 1, с-е показаны некоторые из возможных конфигураций решеток преобразователей, запитываемых противофазно.

В настоящей работе расчет АЧХ АОД проведен для случая решетки преобразователей в виде ромба (рис. 2). Из рисунка видно, что длина взаимодействия света и ультразвука зависит от координаты x ,

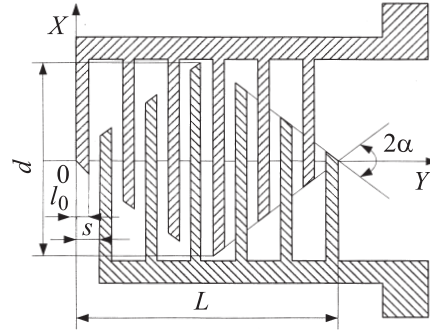


Рис. 2. Многоэлементный поверхностный преобразователь, раскрыв которого выполнен в виде ромба.

если световой пучок направить вдоль оси Oy . Для решетки преобразователей в форме ромба длина АО-взаимодействия в пределах $|x| \leq 0.5d$ изменяется как $l(x) = L - 2|x| \text{ctg}(\alpha) = ms - 2|x| \text{ctg}(\alpha)$; угол α определяет форму решетки.

Обозначим отношение ширины единичного преобразователя к периоду решетки как $l_0/s = k_0$. Перепишем (3) в виде

$$\xi(F) = \frac{(q_0)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{k_0}{2}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi \lambda (ms) f_0^2}{2n v^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1]\right)}{4 \left(\frac{\pi \lambda f_0^2}{2n v^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1]\right)^2} k_0^2$$

или в упрощенном варианте

$$\xi(F) = \frac{(q_1)^2}{[\pi \eta(F)]^2} \text{sinc}^2[(ms) \pi \eta(F)],$$

где

$$\eta(F) = \frac{\lambda f_0^2}{2n v^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1],$$

а

$$q_1 = \left(q_0 k_0 \text{sinc}\left(\frac{k_0}{2}\right)\right)^2 / 4.$$

Запишем интенсивность дифрагированного света для каждой парциальной составляющей в пределах ультразвукового пучка:

$$\xi(F) = \frac{(q_1)^2}{[\pi \eta(F)]^2} \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \text{sinc}^2[(ms - 2|x| \text{ctg}(\alpha)) \pi \eta(F)] dx.$$

После интегрирования последнее выражение примет вид

$$\xi(F) = \frac{(q_1)^2}{[\pi \eta(F)]^2} \left[1 - \text{sinc}(d \text{ctg}(\alpha) \eta(F)) \times \cos(\pi \eta(F) (2ms - d \text{ctg}(\alpha))) \right],$$

подставив в которое $\eta(F)$ и q_1 , получим окончательное выражение для АЧХ:

$$\begin{aligned} \xi(F) = & \frac{(q_0 k_0 \text{sinc}(\frac{k_0}{2}))^2}{2(\frac{\pi \lambda f_0^2}{nv^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1])^2} \\ & \times \left\{ 1 - \text{sinc}\left(\frac{d \text{ctg}(\alpha)}{2} \frac{\lambda f_0^2}{nv^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1]\right) \right. \\ & \times \cos\left(\frac{\pi \lambda f_0^2}{nv^2} [(1+F)(\Theta_0 + 1+F) + 1]\right) \\ & \left. \times \left(m s - \frac{d}{2} \text{ctg}(\alpha)\right) \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Данное выражение справедливо для $\text{arctg}(\frac{d}{L}) \leq \alpha \leq 90^\circ$.

На рис. 3 приведены АЧХ, рассчитанные в соответствии с (4) для двух углов падения света $\Theta_{01} = -2$ и $\Theta_{02} = -2 - 1/m$ и различных углов аподизации — α . Зависимости, показанные на рис. 3, а, со-

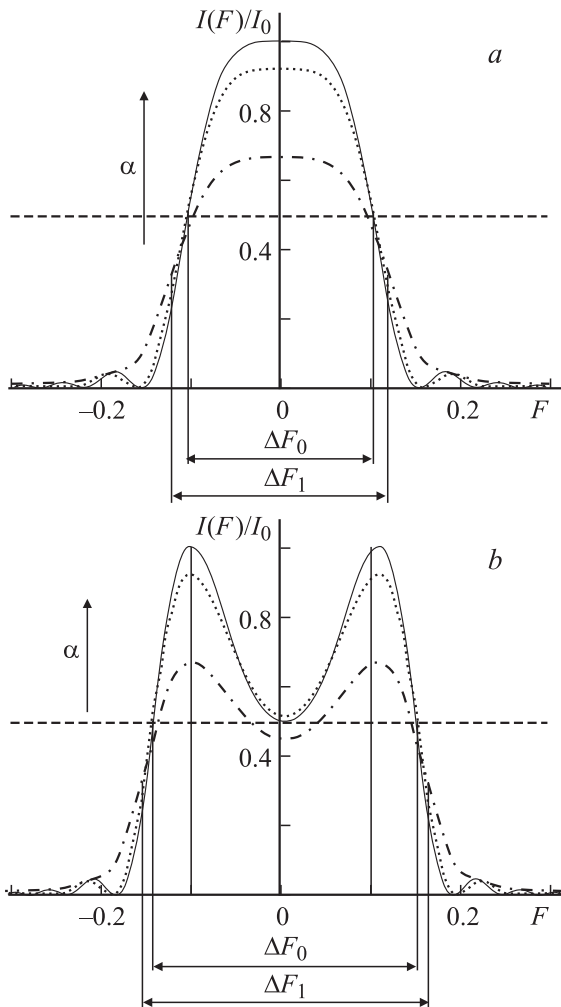


Рис. 3. АЧХ аподизированного многоэлементного АОД при различных углах падения света: а — $\Theta_{01} = -2$; б — $\Theta_{02} = -2 - 1/m$.

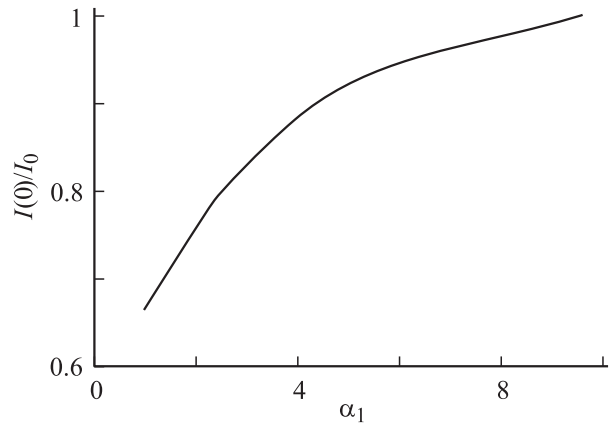


Рис. 4. Зависимость относительной эффективности дифракции $I(0)/I_0$ от угла α_1 .

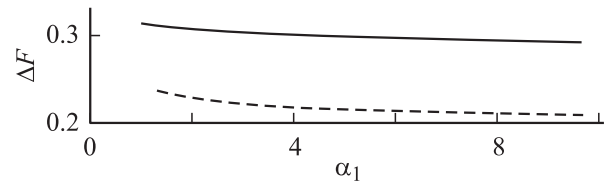


Рис. 5. Зависимость полосы рабочих частот АОД от угла α_1 при углах падения света, соответствующих одnogорбым и двугорбым АЧХ: пунктир — $\Theta_{01} = -2$, сплошная кривая — $\Theta_{02} = -2 - 1/m$.

ответствуют одnogорбым АЧХ, а на рис. 3, б — двугорбым. Расчеты проводились для следующих данных: $\lambda = 0.66 \mu\text{m}$; $f_0 = 1750 \text{ MHz}$; $v = 3.6 \cdot 10^3 \text{ m/s}$; $n = 2.29$; $L = 1.216 \text{ mm}$; $s = 16 \mu\text{s}$; $m = 76$; $d = 0.2 \text{ mm}$; $M_2 = 24 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$.

Кроме того, принималось во внимание, что при аподизации площадь решетки преобразователей изменяется — $S(\alpha) = d(L - 0.5d \text{ctg}(\alpha))$. При расчете АЧХ (рис. 3) и последующих зависимостей, приведенных на рис. 4 и 5, значение $S(\alpha)$ поддерживалось постоянным и равным msd — площади неаподизированной решетки преобразователей.

Из анализа (4) и рис. 3 можно сделать вывод, что с изменением α в пределах от $\text{arctg}(d/L)$ до 90° относительная полоса ΔF (ΔF_0 соответствует неаподизированному ВШП, а ΔF_1 — аподизированному), отсчитываемая по уровню 3 dB, увеличивается на $\approx 16\%$. При этом дифракционная эффективность АОД падает с одновременным уменьшением пульсаций АЧХ вне основной полосы пропускания; характер ее изменения при вариации нормированного угла аподизации $\alpha_1 = \alpha / \text{arctg}(L/d)$ показан на рис. 4.

В качественном отношении аналогичные зависимости характерны и для случая АОД с двугорбыми АЧХ с той разницей, что при $\Theta_{02} = -2 - 1/m$ с увеличением угла α в полосе ΔF наблюдается значительное уменьшение неравномерности АЧХ. Зависимости $\Delta F = \varphi(\alpha_1)$ для обоих углов падения света приведены на рис. 5. АЧХ отличаются друг от друга абсолютным значением ΔF :

при $\Theta_{02} = -2-1/m$ полоса ΔF в среднем в 1.5 раза превышает ΔF АОД при $\Theta_{01} = -2$. Физическая причина рассмотренного явления достаточно прозрачна: падающий на АОД свет в процессе распространения взаимодействует с ультразвуковым пучком разной протяженности и соответственно переменной по его сечению расходимостью, что и обуславливает расширение полосы частот АО-взаимодействия и уменьшение (сглаживание) неравномерности дифракционной эффективности.

Экспериментальная часть

Результаты проведенного анализа находятся в удовлетворительном количественном соответствии с экспериментом, целью которого было сопоставление основных параметров двух видов АОД, работающих в диапазоне частот 1.5–2 НГц; все параметры исследуемых АОД соответствовали принятым при расчете АЧХ, представленным на рис. 3.

В АОД, выполненных на основе LiNbO_3 , возбуждение ультразвука осуществлялось с поверхности

Z-среза системой противофазных электродов с $m = 76$, $d = 0.2 \text{ mm}$, $s = 16 \mu\text{m}$, $l_0 = 8 \mu\text{m}$, $f_0 = 1750 \text{ MHz}$. В двух из четырех экземпляров АОД решетка ВШП была выполнена в виде ромба с параметрами: $d = 0.2 \text{ mm}$, $L = 1.216 \text{ mm}$ и $\alpha = 9.34^\circ$. У двух других образцов АОД решетка ВШП была прямоугольной с постоянной длиной АО-взаимодействия.

Экспериментальные АЧХ двух видов АОД при различных углах падения света ($\lambda = 0.66 \mu\text{m}$), $\Theta_{01} = -2$ и $\Theta_{02} = -2-1/m$ на частоте приведены на рис. 6.

При энергетически оптимальном угле падения света ΔF_{Σ} АОД по уровню — 3 дБ с аподизацией увеличивалась на 15%; ориентировочно на такую же величину увеличилась и ΔF_1 при Θ_{02} . Неравномерность АЧХ аподизированных АОД в полосе рабочих частот, присущих неаподизированным АОД, уменьшилась на 1.5–2 дБ, при этом наблюдалось как подавление уровней на 5–8 дБ, так и сглаживание побочных полос пропускания. В сравнении с обычными в АОД с аподизированными ВШП наблюдалось также уменьшение дифракционной эффективности в 2.5–4 раза, а именно с 3.2 до 0.8–1.5% на ватт подаваемой электрической мощности.

Важно отметить также тот факт, что, как показал эксперимент, если не стремиться к реализации максимально широких ΔF , то в аподизированных АОД, даже при углах падения света, близких к Θ_{02} , возможно получение практически плоских АЧХ с неравномерностью в полосе $\sim 500 \text{ MHz}$ порядка 1–1.5 дБ.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что как и в случае низкочастотных одноэлементных АОД [1–3], так и в АОД с противофазным набором поверхностных преобразователей, полосы рабочих частот могут быть расширены, а паразитные полосы пропускания сглажены путем аподизации — изменения протяженности АО-взаимодействия по свету. При этом если угол падения света на АОД отличается от брэгговского для центральной частоты f_0 , то дополнительно к перечисленному наблюдается существенное уменьшение неравномерности дифракционной эффективности АОД в полосе рабочих частот.

Последнее, по-видимому ранее не отмеченное явление, может и должно найти практическое применение.

Список литературы

- [1] Волошинов В.Б., Князев Г.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 118–122.
- [2] Парыгин В.Н., Вершубский А.В., Филатова Е.Ю. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 9. С. 73–78.
- [3] Богомолов Д.В., Мильков М.Г., Парыгин В.Н. // Р и Э. 2006. Т. 51. № 1. С. 100–106.
- [4] Роздобудько В.В., Бакарюк Т.В. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 74–76.
- [5] Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

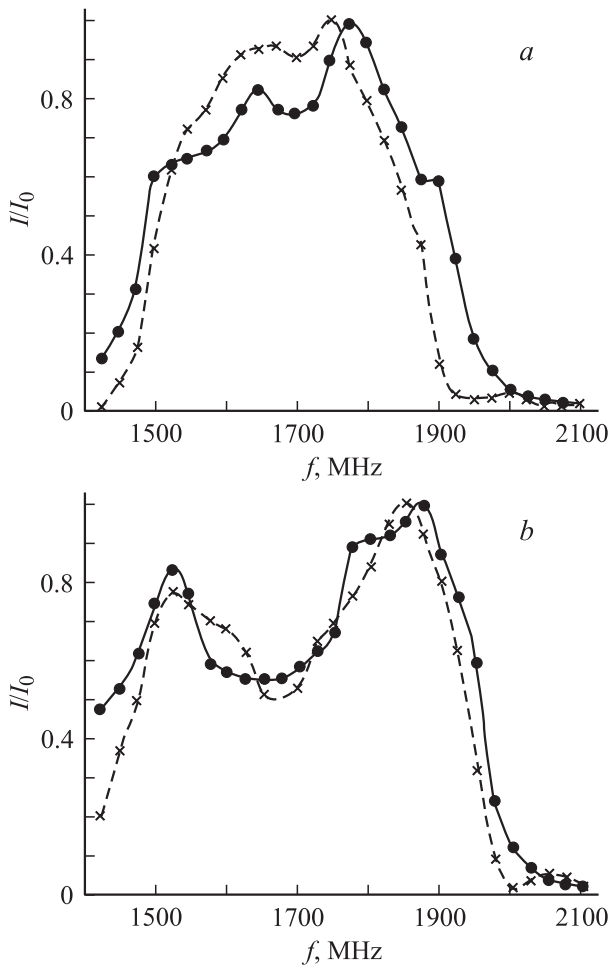


Рис. 6. Экспериментальные нормированные АЧХ аподизированного (сплошные кривые) и неаподизированного (пунктир) многоэлементного АОД при различных углах падения света: $a - \Theta_{01} = -2$; $b - \Theta_{02} = -2-1/m$.