

УДК 534:535; 681.7

АНАЛИТИЧЕСКАЯ УГЛОЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО СЕКЦИОНИРОВАННЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКА

© П. А. Никитин^{1,2}¹Научно-технологический центр уникального приборостроения,
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
E-mail: nikitin.pavel.a@gmail.com

Акустооптические дефлекторы терагерцевого излучения, изготовленные на основе оптически изотропной среды, характеризуются низким числом разрешённых световых пятен. Существенного улучшения характеристик дефлектора можно добиться при использовании секционированного фазированного излучателя ультразвука. В работе впервые аналитически получена углочастотная зависимость для такого дефлектора, а также уточнено положение на ней рабочей точки с учётом влияния зазора между секциями излучателя ультразвука.

Ключевые слова: акустооптика, терагерцевое излучение, дефлектор, секционированный излучатель.

DOI: 10.15372/AUT20240305

EDN: JJAPWD

Введение. Акустооптические (АО) устройства позволяют управлять пучками излучения в реальном времени, что обеспечивается отклонением излучения на фазовой структуре, наведённой ультразвуком в среде. Эти устройства нашли широкое применение в науке и технике благодаря компактности, быстродействию и надёжности. Для сканирования пучка излучения в широком угловом диапазоне используются АО-дефлекторы, изготовленные на основе двулучепреломляющих монокристаллов, таких как ниобат лития LiNbO_3 , парателлури́т TeO_2 , каломель Hg_2Cl_2 [1, 2]. Выбор материала обуславливается поставленными задачами, а также спектральным диапазоном излучения. Действующие коммерческие АО-устройства работают лишь в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах. Для длинноволновых диапазонов, например для терагерцевого диапазона, характерно использование микроструктур субволновой топологии [3], а также применение других методов оптической обработки информации, таких как модуляция свойств метаповерхности под действием приложенного напряжения или излучения [4]. Основным препятствием для развития АО-методов в ТГц-диапазоне (длина волны около 100 мкм) являлось два фактора. Первый — непрозрачность многих хорошо зарекомендовавших себя АО-кристаллов в ТГц-диапазоне, а второй фактор — это низкая интенсивность пучка отклонённого излучения, определяемая эффективностью АО-взаимодействия, которая обратно пропорциональна квадрату длины волны излучения [5]. Однако в работе [6] было экспериментально установлено, что эффективность АО-взаимодействия можно повысить на два порядка при использовании сжиженного инертного газа, такого как гексафторид серы SF_6 , в качестве среды взаимодействия. В [6] был продемонстрирован прототип АО-модулятора ТГц-излучения, который характеризовался максимальной эффективностью АО-взаимодействия около 80 %. Поскольку сжиженный SF_6 оптически изотропен,

то число N разрешённых световых пятен предложенного прототипа, которое можно оценить по известным соотношениям, чрезвычайно мало и составляет около $N \approx 2$. Поэтому целью данной работы является улучшение характеристик АО-дефлектора на основе оптически изотропной среды.

Как показано в [7], число разрешённых световых пятен может быть увеличено при использовании секционированного излучателя ультразвука. Наибольший эффект даёт подача электрического сигнала на соседние секции излучателя со сдвигом фаз, причём этот сдвиг должен определённым образом зависеть от частоты сигнала [8]. Недостатком этого метода является наличие двух главных лепестков диаграммы направленности генерируемого ультразвукового пучка и, как следствие, уменьшение в два раза эффективности АО-взаимодействия в расчёте на 1 Вт электрической управляющей мощности. Другой метод состоит в использовании ступенчатого излучателя ультразвука, толщина которого увеличивается от секции к секции на постоянную величину, а сигнал подаётся на секции синфазно [9]. Этот метод позволяет подавить один из двух главных лепестков в диаграмме направленности, но изготовление такого излучателя сопряжено с рядом трудностей.

Следуя работе [10], предлагаем использовать существенно более простой метод, а именно: подавать на соседние секции излучателя ультразвука сигнал в противофазе. В результате согласно расчётам [11] число разрешённых световых пятен может быть увеличено в три раза по сравнению со случаем, когда сигнал подаётся на соседние секции в фазе. В указанных работах проведена оценка влияния лишь числа секций излучателя на характеристики АО-дефлектора. Задача, решаемая в данной работе, состоит в определении зависимости характеристик АО-дефлектора от расстояния между соседними секциями излучателя ультразвука.

Модель акустооптического взаимодействия. Будем считать, что излучатель ультразвука длиной L и шириной d состоит из m одинаковых секций, длина каждой из которых равна L_1 , а длина покрытой электродом области равна D_1 и задаётся через безразмерный коэффициент пропорциональности C_D :

$$D_1 = C_D L_1; \quad L_1 = \frac{L}{m}, \quad (1)$$

где индекс 1 у параметров D_1 и L_1 означает, что они относятся к одной секции излучателя.

Одним из важных параметров АО-устройства является эффективность дифракции, равная отношению интенсивности дифрагированного излучения к интенсивности падающего на АО-устройство излучения [12]. Если среда АО-взаимодействия является оптически и акустически изотропной, то выражение для эффективности ξ АО-дифракции, справедливое для любого чётного m , при $\xi \ll 1$ имеет вид [7]

$$\xi = T \left(\frac{1}{16} k_0^2 p^2 n^6 S^2 \right) D_1^2 \left(\frac{\sin(\kappa D_1/2)}{\kappa D_1/2} \right)^2 \left(\frac{\sin(\kappa L_1 - \pi)m/2}{\sin(\kappa L_1 - \pi)/2} \right)^2, \quad (2)$$

где T — коэффициент пропускания АО-устройства; p — фотоупругая постоянная, связанная с коэффициентом АО-качества среды M_2 , плотностью ρ , скоростью звука V и показателем преломления n ; S — безразмерная деформация, пропорциональная корню из мощности ультразвука P_a :

$$p = \sqrt{M_2 \frac{\rho V^3}{n^6}}; \quad S = \sqrt{\frac{2P_a}{\rho V^3 d(mD_1)}}, \quad (3)$$

а κ — фазовая расстройка от условия синхронизма, связанная с волновыми числами ультразвука K и излучения k , а также с углом $\theta \ll 1$ между волновым вектором излучения и

плоскостью излучателя ультразвука:

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda}; \quad K = \frac{2\pi F}{V}; \quad \kappa = K\left(\theta - \frac{K}{2k}\right). \quad (4)$$

Функция $\xi(F, \theta)$ состоит из двух дробных множителей, второй из которых осциллирует в m раз быстрее, чем первый. Поэтому при $m \gg 1$ влиянием зазора между электродами соседних секций излучателя ультразвука можно пренебречь. В работе [11] были получены приближённые соотношения для оценки центральной частоты F_d АО-дефлектора, а также оптимального угла θ_i , при котором частотная характеристика $\xi(F)$ практически не имеет провала в центре:

$$F_d = V \sqrt{m \frac{n}{\lambda L}}; \quad \theta_i = \sqrt{m \frac{\lambda}{n L}}. \quad (5)$$

В то же время наличие зазора должно влиять на диаграмму направленности ультразвукового пучка и, как следствие, на частотную характеристику АО-дефлектора. Поэтому без ограничения общности перейдём в уравнении (2) к безразмерным параметрам $f = F/F_d$ и $\varphi = \theta/\theta_i$:

$$\xi = T \frac{2M_2 P_a L}{\lambda^2 d} \frac{\sin^2(\pi f(f - 2\varphi)C_D/2)}{m^2 C_D f^2 (f - 2\varphi)^2} \frac{\sin^2(\pi f(f - 2\varphi)m/2)}{\cos^2(\pi f(f - 2\varphi)/2)}. \quad (6)$$

В предлагаемой работе проводится анализ полученного выражения с целью уточнения соотношений для центральной частоты F_0 АО-дефлектора, а также для оптимального угла падения излучения θ_0 .

Условие достижения максимальной эффективности акустооптической дифракции. Из (6) следует, что эффективность АО-дифракции зависит от f и φ в виде одной комбинации, что позволяет существенно упростить расчёты:

$$x = f(f - 2\varphi), \quad (7)$$

$$\xi = T \frac{2M_2 P_a L}{\lambda^2 d} \frac{\sin^2(\pi x C_D/2)}{m^2 C_D x^2} \frac{\sin^2(\pi x m/2)}{\cos^2(\pi x/2)} = T \frac{\pi^2 M_2 P_a L}{2\lambda^2 d} \xi_{\text{norm}}. \quad (8)$$

Эффективность АО-дифракции достигает максимума примерно при $f = 1$ и $\varphi = 1$, что соответствует $x = -1$. Как видно из рис. 1, положение максимума смещается при изменении зазора между электродами соседних секций излучателя ультразвука.

Для уточнения положения максимума x_{opt} функции $\xi(x)$ был построен график её производной $d\xi/dx$ для различных значений параметра C_D (рис. 2).

Такие же графики были получены и для других значений числа m секций излучателя ультразвука. Далее, используя метод наименьших квадратов, была определена зависимость $x_{\text{opt}}(C_D)$ для каждого m . Результаты расчёта приведены в таблице. Установлено, что эта зависимость достаточно точно описывается полиномиальной функцией вида

$$x_{\text{opt}} = -1 + a \cdot C_D^b. \quad (9)$$

Для оценки точности выражения (9) было вычислено отклонение от рассчитанной зависимости $x_{\text{opt}}(C_D)$, соответствующей $d\xi/dx = 0$, в диапазоне $0 \leq C_D \leq 1$. Как следует из таблицы, модуль максимального отклонения для x_{opt} не превышает 1 % и убывает при увеличении числа m секций излучателя ультразвука.

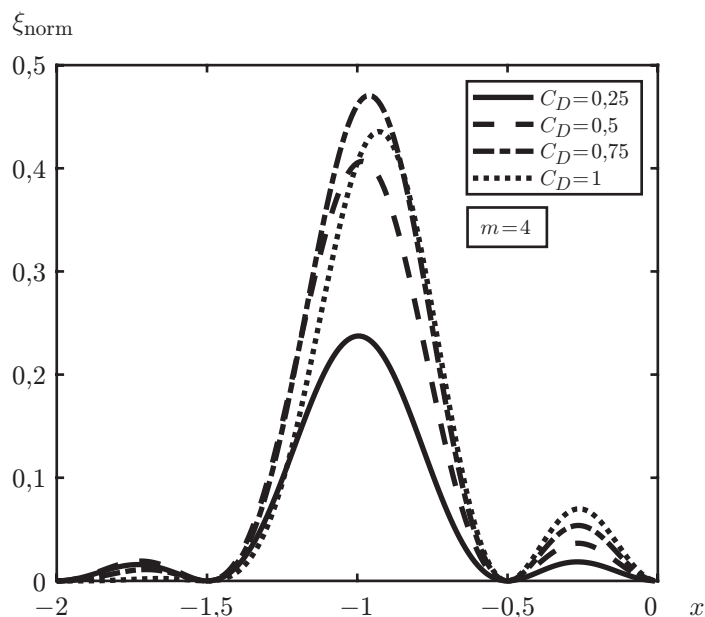


Рис. 1. Зависимость нормированной эффективности дифракции от безразмерной комбинации частоты ультразвука и угла падения излучения

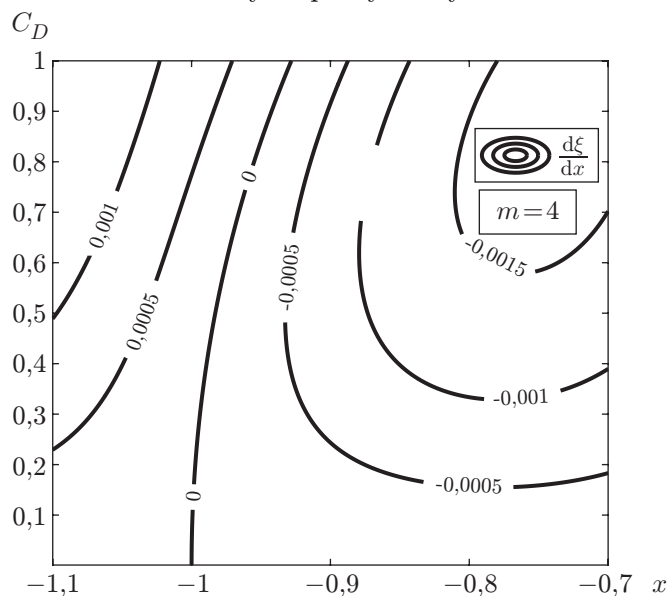


Рис. 2. Производная от эффективности дифракции в зависимости от зазора между электродами излучателя ультразвука, а также от безразмерной комбинации частоты ультразвука и угла падения излучения

Таблица

Зависимость коэффициентов a и b и их погрешностей от количества секций излучателя ультразвука

m	2	4	6	8	10	20
a	0,2653	0,07064	0,03252	0,01845	0,01185	0,002977
Δa	0,0005	0,00003	0,00003	0,00002	0,00002	0,000021
b	1,739	2,072	2,148	2,177	2,192	2,205
Δb	0,005	0,002	0,004	0,004	0,004	0,004
$ \max(\Delta x_{\text{opt}}) $	0,007	0,0003	0,0005	0,0003	0,0002	0,00005

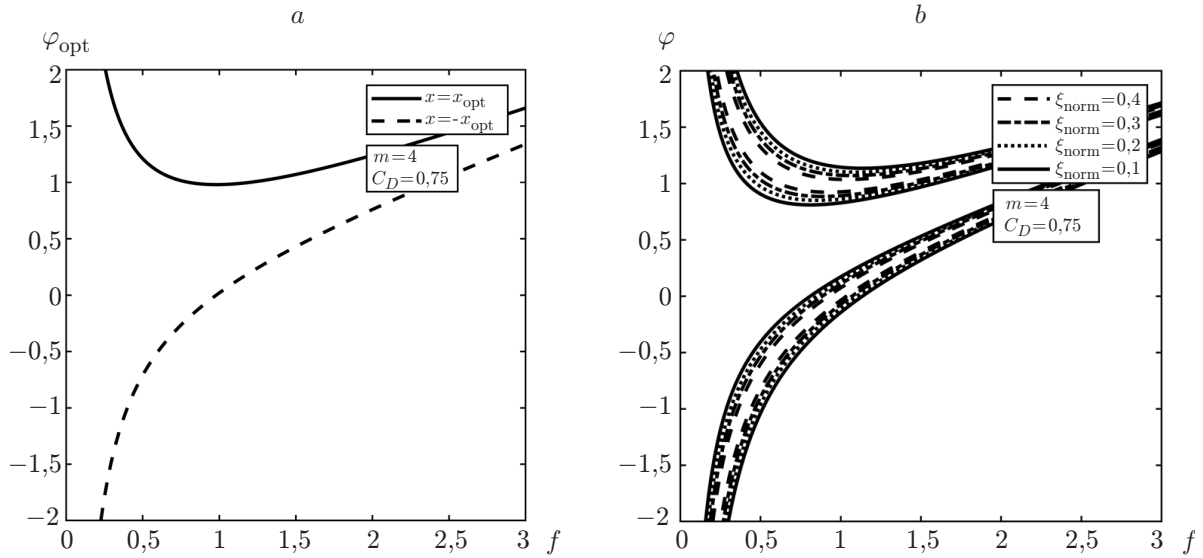


Рис. 3. Характеристики АО-дефлектора: углочастотная зависимость (а); зависимость нормированной эффективности АО-дифракции от угла падения излучения и частоты ультразвука (b)

Углочастотная зависимость и рабочая точка акустооптического дефлектора. Подставляя значение оптимального коэффициента x_{opt} для заданных параметров излучателя ультразвука C_D и m в соотношение (7), найдём зависимость безразмерного оптимального (эффективность АО-дифракции максимальна) угла падения излучения от безразмерной частоты ультразвука. Поскольку функция $\xi(x)$ чётная, то углочастотная зависимость имеет также вторую ветвь, соответствующую $x = -x_{\text{opt}}$:

$$\varphi_{\text{opt}} = \frac{f^2 - x}{2f} \Big|_{x=\pm x_{\text{opt}}} . \quad (10)$$

Ниже на рис. 3, а представлены две ветви рассчитанной по соотношению (10) углочастотной зависимости для АО-дефлектора, использующего секционированный излучатель с $m = 4$ секциями и коэффициентом покрытия электродом $C_D = 0,75$. Для сравнения на рис. 3, b приведена зависимость нормированной эффективности АО-дифракции от безразмерного угла падения излучения и безразмерной частоты ультразвука, рассчитанная по формуле (6).

Для режима дефлектора рабочей точке по углу падения излучения соответствует участок углочастотной зависимости с горизонтальной касательной. Благодаря этому при изменении частоты ультразвука в широком диапазоне эффективность АО-дифракции будет изменяться значительно слабее, чем для любой другой рабочей точки. Непосредственным дифференцированием соотношения (10) можно показать, что рабочая точка АО-дефлектора и соответствующая ей частота ультразвука определяются следующим образом:

$$\varphi_i = \sqrt{-x_{\text{opt}}} , \quad f_d = \sqrt{-x_{\text{opt}}} . \quad (11)$$

Возвращаясь обратно к размерным переменным, получаем следующее выражение для углочастотной зависимости:

$$\theta_{\text{opt}} = \frac{F\lambda}{2nV} + \frac{mV}{2LF} (1 - a \cdot C_D^b), \quad (12)$$

а рабочая точка с учётом (9) и (11) должна задаваться следующим образом:

$$\theta_i = \sqrt{m \frac{\lambda}{nL}} \sqrt{1 - a \cdot C_D^b}; \quad F_d = V \sqrt{m \frac{n}{\lambda L}} \sqrt{1 - a \cdot C_D^b}, \quad (13)$$

где значения коэффициентов a и b приведены в таблице для некоторых значений числа m секций излучателя ультразвука.

Приведём пример оценки характеристик АО-дефлектора пучка ТГц-излучения с диаметром $D = 1$ см и длиной волны $\lambda = 130$ мкм. В качестве среды АО-взаимодействия оптимальным является сжиженный гексафторид серы (SF_6), так как эффективность дифракции при использовании других сред на порядок меньше. Параметры этой среды следующие: $n \approx 1,2$, $V \approx 300$ м/с, $M_2 \approx 15000 \cdot 10^{-15}$ с³/кг [6]. Поскольку в SF_6 затухание ультразвука составляет около 2 дБ/см при частоте ультразвука 300 кГц [6], то использование более высоких частот нецелесообразно. Тогда, подставляя $F_d \approx 300$ кГц, а также характерные параметры излучателя ультразвука (длина $L = 8$ см, ширина $d = 1$ см) в соотношение (13), можно оценить необходимое число секций такого излучателя $m \approx 8,7$. Округление с учётом того, что число секций m чётное, даёт $m = 8$. Как показано в [7], для АО-дефлектора является оптимальным значение параметра $C_D \approx 0,742$. Рассчитанная по данным таблицы для $m = 8$ относительная поправка к углу падения излучения и к частоте ультразвука составляет $1 - \sqrt{1 - a \cdot C_D^b} \approx 0,48$ % или в абсолютных единицах $1'40''$ и $1,4$ кГц соответственно. Поэтому, согласно уточнённому выражению (13): $F_D \approx 286,8$ кГц, $\theta_i \approx 0,1036 \approx 5^\circ 56'$. Оценочная эффективность дифракции составляет $\xi_{\text{norm}} \approx 0,46$ от эффективности дифракции для АО-дефлектора с односекционным излучателем той же длины, которая в эксперименте составляет около 0,1 % без учёта коэффициента пропускания АО-устройства [13]. Столь малое значение ξ_{norm} обусловлено тем, что описанный секционированный фазированный излучатель генерирует два звуковых пучка под небольшим углом друг к другу, а излучение дифрагирует лишь на одном из указанных пучков. Оценочное число разрешённых световых пятен на выходе АО-дефлектора с секционированным фазированным излучателем составляет $N \approx 6,5$ [11], тогда как для АО-устройства с односекционным излучателем той же длины в эксперименте достигнуто $N = D \Delta F / V \approx 1,4$ [13].

Заключение. Впервые получена аналитическая углочастотная зависимость для АО-устройства с секционированным излучателем ультразвука. Она позволяет определять не только оптимальные условия для достижения максимальной эффективности АО-дифракции, но и положение рабочей точки для режима дефлектора. Полученные выражения для угла падения излучения и частоты ультразвука, соответствующие этому режиму, учитывают наличие зазора между секциями излучателя ультразвука. Таким образом, результаты работы могут быть применены при проектировании АО-дефлекторов для спектральных диапазонов излучения, в которых перспективно использование оптически изотропных веществ в качестве среды АО-взаимодействия.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FFNS-2022-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gulyaev Yu. V., Kazaryan M. A., Mokrushin Yu. M., Shakin O. V. Acousto-optic laser projection systems for displaying TV information // Quant. Electron. 2015. **45**, N 4. P. 283–300.

2. Maksimenka R., Nuernberger P., Lee K. F. et al. Direct mid-infrared femtosecond pulse shaping with a calomel acousto-optic programmable dispersive filter // Opt. Lett. 2010. **35**, N 21. P. 3565–3567.
3. Генцелев А. Н., Кузнецов С. А., Дульцев Ф. Н. и др. Реализация терагерцовых фильтров высоких частот на основе цельнометаллических микроструктур с использованием глубокой рентгенолитографии // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 14–27. DOI: 10.15372/AUT20190202.
4. Sarieddeen H., Alouini M.-S., Al-Naffouri T. Y. An Overview of Signal Processing Techniques for Terahertz Communications // Proc. IEEE. 2021. **109**, Iss. 10. P. 1628–1665.
5. Porokhovnichenko D. L., Voloshinov V. B., Dyakonov E. A. et al. Application potential of paratellurite and iodic acid crystals for acousto-optics in the terahertz range // Phys. Wave Phenomena. 2017. **25**, Iss. 2. P. 114–118.
6. Dürr W. Acousto-optic interaction in gases and liquid bases in the far infrared // Int. Journ. Infrar. and Millimeter Waves. 1986. **7**, Iss. 10. P. 1537–1558.
7. Gordon E. I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Proc. IEEE. 1966. **54**, N 10. P. 1391–1401.
8. Aboujeib J., Pérennou A., Quintard V., Le Bihan J. Planar phased-array transducers associated with specific electronic command for acousto-optic deflectors // Journ. Opt. A: Pure and Appl. Opt. 2007. **9**, N 5. P. 463–469.
9. Chang I. C. Acoustooptic Devices and Applications // IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1976. **23**, Iss. 1. P. 2–21.
10. Balakshy V., Kupreychik M., Mantsevich S., Molchanov V. Acousto-Optic Cells with Phased-Array Transducers and Their Application in Systems of Optical Information Processing // Materials. 2021. **14**, Iss. 2. DOI: 10.3390/ma14020451.
11. Nikitin P. A. Simulation of an acousto-optic deflector of terahertz radiation based on a sectioned ultrasound transducer // Journ. Opt. Technol. 2023. **90**, Iss. 2. P. 88–92.
12. Antonov S. N. Acousto-optic deflector: A new method to increase the efficiency and bandwidth // Technical Phys. 2016. **61**, Iss. 10. P. 1597–1601.
13. Nikitin P. A., Gerasimov V. V., Khasanov I. S. Acousto-Optic Modulation and Deflection of Terahertz Radiation // Materials. 2022. **15**, Iss. 24. 8836. DOI: 10.3390/ma15248836.

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 01.12.2023

Принята к публикации 17.04.2024
