

Акустооптические методы в терагерцевом диапазоне

П.А. НИКИТИН

Научно-технологический центр уникального приборостроения (НТЦ УП) РАН, Москва
E-mail: nikitin.pavel.a@gmail.com

Аннотация

Проанализированы пути развития акустооптических (АО) методов управления оптическим излучением в терагерцевом (ТГц) диапазоне. Выделены особенности при работе с длинноволновым излучением. Систематизированы требования к среде АО взаимодействия в ТГц диапазоне и приведены оценки достижимых характеристик АО устройств. Дан обзор методов и достижений в области ТГц акустооптики, и указаны перспективные направления её развития.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, терагерцевое излучение, модулятор, дефлектор, фильтр.

Введение

Акустооптический (АО) эффект заключается в том, что под действием ультразвуковой волны в среде наводится фазовая структура, с которой взаимодействует оптическое излучение. Благодаря этому можно в реальном времени управлять световыми пучками. Существует множество применений АО эффекта: управляемое отклонение пучка, амплитудная модуляция, изменение структуры и динамическая фокусировка пучка [1]. Различают два режима АО взаимодействия: 1) режим Брэгга, когда излучение падает под углом Брэгга θ_B и существует лишь два пучка на выходе устройства (рис. 1); 2) режим Рамана-Ната, когда существует множество пучков. Критерием же оценки служит параметр Кляйна-Кука $Q=K^2L/k$, где K и k – модули волновых векторов ультразвука и света соответственно, а L – длина АО взаимодействия [2]. Режим Рамана-Ната реализуется при $Q \ll \pi$, тогда как режим Брэгга – при $Q \gg \pi$.

Для определения направления распространения отклонённого пучка используют векторные диаграммы (рис. 2), которые следуют из закона сохранения импульса [3]:

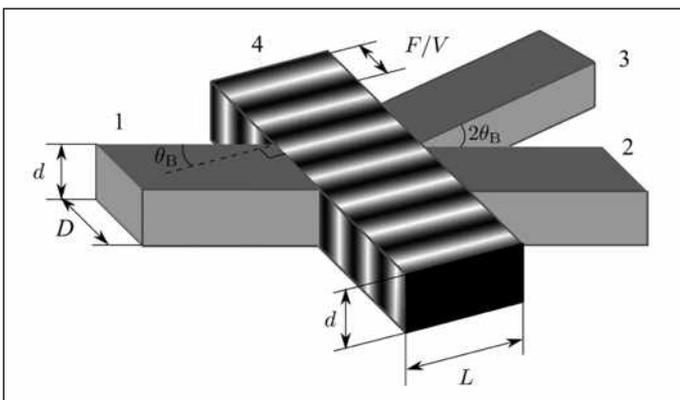


Рис. 1. Схема АО взаимодействия в режиме Брэгга: 1, 2 и 3 – пучки падающего, прошедшего и отклонённого излучений; 4 – звуковой пучок

$$\vec{k}_1 \approx \vec{k}_0 + \vec{K},$$

где \vec{K} – волновой вектор ультразвуковой волны, \vec{k}_0 и \vec{k}_1 – волновые векторы падающего и отклонённого излучений.

При изменении частоты ультразвука F изменяется и направление \vec{k}_1 , что обеспечивает угловое сканирование пучка отклонённого излучения и позволяет создавать дефлекторы световых пучков. Однако, чем больше модуль расстройки, тем меньше интенсивность отклонённого излучения. Поэтому в идеальном АО дефлекторе расстройка должна быть равна нулю в как можно более широком диапазоне частот (рис. 2, б).

Одна из важных характеристик АО – эффективность взаимодействия ξ , которая равна отношению интенсивностей отклонённого (I_1) и падающего (I_0) пучков излучения в расчёте на 1 Вт акустической мощности (мощности ультразвука) P_a . При $\xi \ll 1$ можно использовать упрощённое соотношение, соответствующее линейному режиму относительно P_a [4]:

$$\xi = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\pi^2}{2\lambda^2 \cos\theta_i} \frac{M_2 P_a}{d} L_i \quad (1)$$

где L и d – длина и ширина излучателя ультразвука соответственно; M_2 – коэффициент АО качества среды; θ_i – угол падения излучения на ультразвуковой столб.

Коммерческие АО устройства разработаны лишь для УФ, видимого и ИК диапазонов. Это связано с тем, что ξ быстро уменьшается с ростом λ излучения, т.к. $\xi \propto 1/\lambda^2$. В то же время активно развиваются направления, связанные с длинноволновым излучением терагерцевого (ТГц) диапазона. Помимо исследования биологических объектов, молекулярной спектроскопии и информационных технологий, в которых используется волновая природа этого излучения, это ещё медицина и дефектоскопия [5]. Кроме того, существуют источники мощных ТГц пучков (например, гиротроны и лазеры на свободных электронах), имеющие широкое применение в науке и технике, для которых необходимы средства управления пучком в реальном

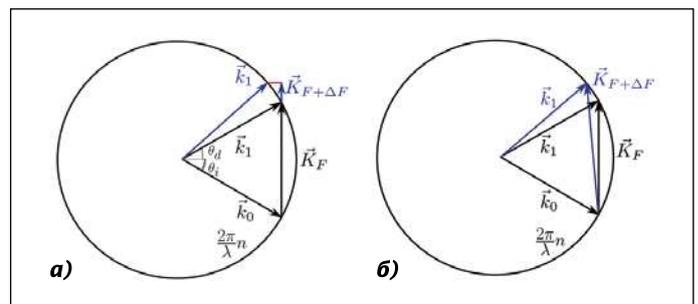


Рис. 2. Векторные диаграммы, описывающие АО взаимодействие: а – при наличии расстройки (обозначена красным) от условия синхронизма; б – идеальный АО дефлектор

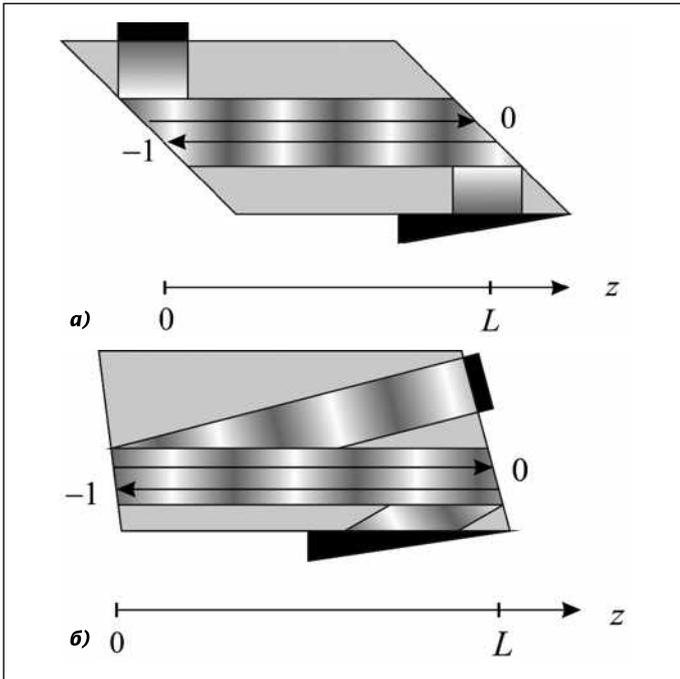


Рис. 3. Схемы АО фильтров на основе сред с разным показателем преломления n : а – $1 < n < 2$; б – $n > 2$

времени и системы стабилизации параметров пучка. Указанные проблемы могут быть решены методами акустооптики. В настоящей работе описаны основные достижения этой новой области: дана оценка технических характеристик АО устройств, приведены результаты экспериментальных исследований и обсуждены вопросы оптимизации созданных устройств, а также перспективы развития этого направления.

Оценка характеристик ТГц АО устройств

Существуют классические работы [6], в которых систематизированы физические свойства ряда кристаллов с точки зрения применения их в акустооптике. Для ТГц диапазона подобная систематизация была проведена лишь недавно [7, 8]. При этом стоит отметить, что для работы в видимом и ИК диапазонах подходит лишь небольшое число материалов с выдающимися АО характеристиками – парателлурид (TeO_2), ниобат лития ($LiNbO_3$), каломель (Hg_2Cl_2) и теллур (Te), причём все они двулучепреломляющие. В длинноволновом же диапазоне такие кристаллы практически непрозрачны [9]. Поэтому приходится использовать оптически изотропные среды (кубические монокристаллы, пластмассы, жидкости), что существенно ограничивает возможности АО устройств. Ниже обсуждаются особенности АО взаимодействия в ТГц диапазоне и используемые технические решения.

Ввиду существенного поглощения излучения и ультразвука размеры АО устройств вынужденно ограничены оптимальной длиной АО взаимодействия L_{opt} , соответствующей максимально достижимой I_1 . Максимальное число разрешённых пятен N , а также ξ АО deflectоров и модуляторов, работающих в режиме квазиортогональной геометрии ($|\vec{K}| \ll |\vec{k}_0|$ и $\theta_i \ll 1$), можно оценить следующим образом:

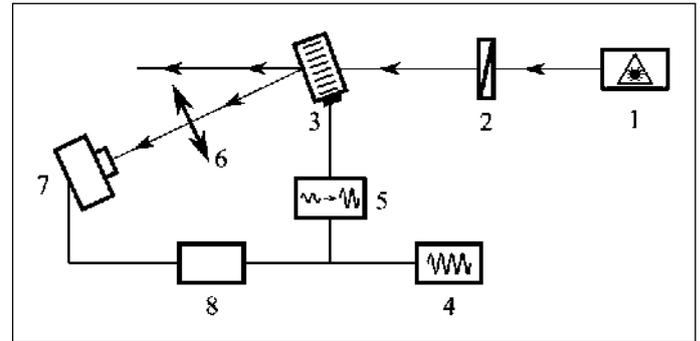


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – поляризатор; 3 – АО ячейка; 4 – генератор электрических сигналов; 5 – усилитель; 6 – линза; 7 – приёмник излучения; 8 – синхронный детектор

$$L = L_{opt} = \frac{1}{\alpha}; \quad \xi = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} \frac{M_2 P_a}{d} L; \quad N = \frac{1,8nVD}{\lambda FL}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; D – диаметр пучка излучения в плоскости АО взаимодействия; α – показатель поглощения излучения по интенсивности ($I \propto \exp[-\alpha x]$).

При коллинеарной геометрии АО взаимодействия ($|\vec{K}| \approx 2|\vec{k}_0|$) в оптически изотропной среде отклонённое излучение распространяется навстречу падающему, и взаимодействие происходит при частоте ультразвука $F = 2nV/\lambda$ [10]. Из двух вариантов ввода излучения в АО ячейку, сонаправленно направлению ультразвука ($\vec{k}_0 \uparrow \vec{K}$) или встречно ($\vec{k}_0 \uparrow \downarrow \vec{K}$), более эффективным оказывается первый [11], что объясняется большей степенью перекрытия взаимодействующих пучков.

Отдельная задача в коллинеарных устройствах – способ сведения и разделения излучения и звука. Как правило, для этого используется вспомогательное отражение ультразвука от входной и выходной оптических граней. В то время, как для видимого диапазона показатель преломления кристаллических сред мал ($1 < n < 2$) и ультразвук удобнее вводить с боковой грани (рис. 3, а), для длинноволнового излучения показатель преломления кристаллических сред $n \approx 3$ и приходится использовать конфигурацию ввода (рис. 3, б), в которой ультразвук проходит АО ячейку дважды. В то же время для АО фильтров на основе жидкостей ($n \approx 1,4$) можно использовать первую схему с меньшим пробегом ультразвука, что позволяет увеличить ξ (рис. 3, а).

При реализации АО фильтра на основе жидкостей наибольшее значение L_1 достигается при бесконечно большой L . Поэтому I_0 будет очень мала, и ξ оценивается, как $\xi = I_1/I_0^*$, где I_0^* – интенсивность падающего на АО ячейку излучения. Основные параметры АО фильтров на основе жидкостей следующие [8]:

$$L_{opt} = \infty; \quad \xi = \frac{I_1}{I_0^*} = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} \frac{M_2 P_a}{S} \left(\alpha + \frac{\alpha_s}{2} \right)^{-2};$$

$$R = \frac{2\pi n}{\lambda} \frac{1}{\alpha + \alpha_s / 2},$$

где R – разрешающая способность; α_s – коэффициент затухания ультразвука по мощности ($P_a \propto \exp[-\alpha_s x]$).

Параметры ТГц АО дефлекторов и модуляторов

Среда АО взаимодействия	V , км/с	α , см ⁻¹	$L_{\text{опт}}$, см	F , МГц	M_2 , 10 ⁻¹⁵ с ³ /кг	ξ , 10 ⁻⁴	N	ξN , 10 ⁻²
<i>AlSb</i>	5,11	2,5	0,40	10,2	430	1,6	80	1,3
<i>Ge</i>	5,55	2,3	0,44	11,1	240	1,1	80	0,9
<i>GaAs</i>	5,39	4,5	0,22	10,8	120	0,3	150	0,4
<i>Si</i>	9,33	0,36	2,74	18,7	6,5	0,2	11	0,02
<i>GaP</i>	6,65	4,2	0,24	13,3	50	0,1	130	0,14
<i>TeO₂*</i>	600	2	0,50	0,15	100000	8	90	7
<i>C₆H₁₂</i>	1,255	0,37	2,7	2,5	600	8,2	5	0,4
<i>C₆H₁₄</i>	1,077	0,69	1,4	2,1	850	6,0	9	0,5
<i>C₁₆H₃₄</i>	1,338	0,69	1,4	2,9	520	7,1	9	0,6
<i>C₆H₆</i>	1,298	5,5	0,18	3,0	710	1,4	70	0,9
<i>C₈H₁₀</i>	1,360	5,1	0,20	3,1	610	1,1	70	0,8
<i>CCl₄</i>	0,922	1,4	0,7	2,1	1050	7,2	19	1,4
<i>CHBr₃</i>	0,920	6,0	0,17	2,3	960	1,7	90	1,5
<i>CS₂</i>	1,141	3,5	0,29	2,8	1230	3,6	50	1,8

* Расчёты выполнены при $\lambda = 800$ мкм

Для АО фильтров на основе кристаллов выражения для $L_{\text{опт}}$ и R имеют схожий вид [7]:

$$L_{\text{опт}} = \frac{1}{\alpha + \alpha_s/2} \ln \left(\frac{2\alpha}{\alpha_s} + 2 \right);$$

$$\xi = \frac{I_{-1}}{I_0} = \frac{\pi^2 M_2 P_a}{2\lambda^2 S} \left(\alpha + \frac{\alpha_s}{2} \right)^{-2} \times$$

$$\times \left\{ \begin{aligned} &1 + \exp[-2(\alpha + \alpha_s/2)L] - \\ &-2 \exp[-(\alpha + \alpha_s/2)L] \end{aligned} \right\} \times$$

$$\times \exp(-\alpha_s L);$$

$$R = \frac{2\pi n}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{(\alpha + \alpha_s/2)^4 + (0,89\pi/L)^4}}.$$

В работах [7, 8] рассчитаны параметры АО фильтров, а также АО дефлекторов и модуляторов на основе квазиортогональной геометрии (для одного и того же внешнего угла Брэгга $\theta_B = \lambda F/2V = 0,1$). Поскольку оптические свойства сред известны не для всех λ , то расчёты для кристаллов [7] были выполнены при $\lambda = 100$ мкм, а для жидкостей [8] – при $\lambda = 140$ мкм. Моделирование АО взаимодействия проводилось при мощности звука 1 Вт и размерах пучка излучения $D = 10$ мм, $d = 5$ мм для АО дефлекторов и модуляторов и $D = 5$ мм, $d = 5$ мм для АО фильтров (табл. 1 и 2). Для удобства в верхней части каждой таблицы расположены кристаллические среды, а в нижней – жидкости.

Из этих данных следует, что оптимальной средой для ТГц АО фильтра служит гексан (C_6H_{14}), поскольку в этом случае достигаются максимальные значения ξ ($\approx 0,1$ %) и R (≈ 600). Для АО модуляции более пригоден циклогексан (C_6H_{12}), который в этом режиме тоже обеспечивает ξ

$\approx 0,1$ %. В качестве же среды АО дефлектора оптимален тетрагидрометан (CCl_4), поскольку он характеризуется высокой прозрачностью и большим значением произведения $\xi \cdot N$, т.к., варьируя L , можно повышать либо N , либо ξ (см. (2)), именно параметр $\xi \cdot N$, не зависящий от L , характеризует АО дефлекторы.

Перспективная задача – поиск в длинноволновом диапазоне зон прозрачности известных эффективных АО кристаллов. Пока установлено лишь [12], что выдающийся АО кристалл парателлурида (TeO_2) характеризуется большим, но конечным значением α (≈ 10 см⁻¹ на $\lambda = 300$ мкм и ≈ 2 см⁻¹ на $\lambda = 800$ мкм), что позволяет рассмотреть потенциальную возможность его применения. Данный кристалл в ТГц диапазоне имеет значительный n ($\approx 5,2$) [13], благодаря чему его АО качество $M_2 \approx 10^5 \cdot 10^{-15}$ с³/кг (для поперечной акустической волны, распространяющейся вдоль оси [110] с $V = 0,6$ км/с) в режиме квазиортогональной геометрии, что на 2 порядка больше, чем у других рассмотренных сред. В режиме коллинеарной геометрии M_2 тоже достаточно высоко: $\approx 2700 \cdot 10^{-15}$ с³/кг (для продольной акустической волны, распространяющейся вдоль оси [001] с $V = 4,3$ км/с), а коэффициент затухания ультразвука α_s на $F = 55,9$ МГц составляет лишь $\approx 0,06$ см⁻¹ [14]. Как видно из табл. 1 и 2, АО устройства на основе TeO_2 при $\lambda = 800$ мкм характеризуются на порядок большей энергоэффективностью, и это несмотря на увеличение на порядок λ излучения по сравнению с другими кристаллами ($\lambda = 100$ мкм) и жидкостями ($\lambda = 140$ мкм). Следует отметить, что TeO_2 обладает двулучепреломлением, и в нём может быть реализована специализированная «дефлекторная» геометрия взаимодействия, при которой можно на порядок увеличить число разрешённых пятен N . Поэтому данный материал обладает высоким потенциалом в деле создания АО модуляторов, дефлекторов и фильтров дальнего ТГц диапазона.

Параметры ТГц АО фильтров

Среда АО взаимодействия	F , МГц	α_s , см ⁻¹	M_2 , 10 ⁻¹⁵ с ³ /кг	$L_{\text{опт}}$, см	ξ , 10 ⁻⁴	R , 10 ³
<i>AlSb</i>	303,4	1,0	590	0,65	0,5	0,5
<i>Ge</i>	393,9	0,8	110	0,75	0,12	0,6
<i>GaAs</i>	344,0	0,6	70	0,59	0,04	0,4
<i>Si</i>	575,8	0,6	0,3	1,81	0,003	1,4
<i>GaP</i>	393,5	0,5	12	0,68	0,008	0,4
<i>TeO₂*</i>	55,9	0,06	2700	2,06	0,17	0,2
<i>C₆H₁₂</i>	25,4	2,5	600	∞	2,4	0,4
<i>C₆H₁₄</i>	21,1	0,5	850	∞	9,3	0,6
<i>C₁₆H₃₄</i>	27,2	1,5	520	∞	1,5	0,4
<i>C₆H₆</i>	27,7	13	710	∞	0,05	0,06
<i>C₈H₁₀</i>	29,0	1,1	610	∞	0,19	0,12
<i>CCl₄</i>	19,6	4,2	1050	∞	0,9	0,19
<i>CHBr₃</i>	20,9	2,2	960	∞	0,19	0,10
<i>CS₂</i>	26,2	47	1230	∞	0,017	0,027

* Расчёты выполнены при $\lambda=800$ мкм

Экспериментальные исследования АО эффекта в ТГц диапазоне

Первые эксперименты по изучению АО взаимодействия в ТГц диапазоне были проведены в 1980-х гг. с использованием излучения на $\lambda = 119$ мкм [15–17] и продолжены в настоящее время на $\lambda = 130$ мкм [18]. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Исследования проводились с использованием в качестве среды АО взаимодействия прозрачных в ТГц диапазоне материалов. Среди монокристаллов это – германий (*Ge*), среди жидких сред – циклогексан (*C₆H₁₂*) и четырёххлористый углерод (*CCl₄*). Был также использован *TPX*-пластик. Основные результаты сведены в табл. 3. Поскольку некоторые параметры в указанных работах не приведены, то для оценки эффективности дифракции ξ в расчёте на $P_a = 1$ Вт использовались данные из [19, 20].

Таким образом, ξ в ТГц диапазоне при использовании неполярных жидкостей и кубических монокристаллов составляет сотые доли процента. Можно выделить два пути повышения ξ : повышение P_a и поиск другой среды АО взаимодействия. Первый путь имеет существенное ограничение на предельную мощность разрушения кристалла или на порог кавитации в жидкости. В работе [21], ещё 1986 г., автор пошёл по второму пути и предложил использовать сжиженные инертные газы, такие как ксенон (*Xe*) и гексафторид серы (*SF₆*). Данные неполярные вещества имеют простую структуру и благодаря этому прозрачны в ТГц диапазоне. Кроме этого, они имеют низкую скорость звука V (≈ 300 м/с), что обеспечивает рекордное значение M_2 . Но, как видно из табл. 4, существенный недостаток этих веществ – сильное затухание ультразвука на $F=300$ кГц [21].

При размерах излучателя $L = 170$ мм и $d = 12,5$ мм и определённых режимах внутри кюветы – $p = 28$ бар и $t=+13^\circ\text{C}$ – ($M_2 \approx 12000 \cdot 10^{-15}$ с³/кг) максимально возможная ξ , достигнутая в эксперименте, составила 80 %, что соответствует P_a порядка 100 Вт. В указанной работе

отмечено, что в линейном по P_a режиме эффективность составляла 0,6 от теоретического значения. По мнению её автора, это обусловлено расходимостью излучения и затуханием ультразвука.

Как видно, сжиженный *SF₆* действительно открывает перспективы для развития направления ТГц акустооптики. В настоящее время с использованием усовершенствованной модели АО взаимодействия в сжиженном *SF₆* и с учётом температурных эффектов были проведены повторные исследования на $\lambda = 130$ мкм при $L = 80$ мм, $d = 14$ мм, $F \approx 300$ кГц и 2-х режимах внутри АО ячейки: $p = 25$ бар, $t=+23^\circ\text{C}$ и $p = 20$ бар, $t = +10^\circ\text{C}$ [22]. Достигнутые ξ и рабочая полоса частот ΔF в обоих режимах составили 0,23 %/Вт и 37 кГц, что качественно совпало с моделью и соответствует диапазону углов сканирования отклонённого пучка около $0,8^\circ$. Ниже приведены примеры АО устройств на основе сжиженного *SF₆* и рассмотрены способы их оптимизации.

ТГц АО дефлектор на основе сжиженного *SF₆*

Как было показано выше (рис. 2), для увеличения угловой полосы сканирования АО дефлектора на основе оп-

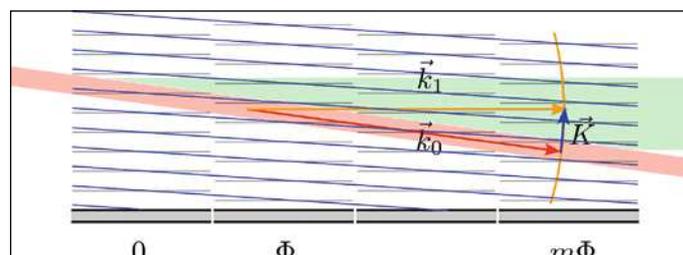


Рис. 5. Схема АО взаимодействия при использовании многосекционного излучателя ультразвука с разностью фаз π между соседними секциями: Пучок падающего излучения обозначен красным, а пучок отклонённого – зелёным

Параметры АО модуляторов ТГц излучения

Среда АО взаимодействия	λ , мкм	L , см	d , см	I_1/I_0^* , %/Вт	I_1/I_0 , %	ξ , %/Вт	Источник
TPX	337	–	–	–	10^{-4}	–	[15]
	119	1,2	2,5	$5 \cdot 10^{-4}$	–	0,00014 ^(Ф)	[16]
Ge	119	2,5	2,5	$5 \cdot 10^{-4}$	–	0,02	[16]
	119	–	–	–	–	0,005 ^(Ф)	[17]
C ₆ H ₁₂	119	2,2	2,5	$33 \cdot 10^{-4}$	–	0,012	[16]
	130	1,0	1,0	–	–	0,02	[18]
CCl ₄	119	2,2	2,5	$33 \cdot 10^{-4}$	–	0,07 ^(Ф)	[16]
	130	1,0	1,0	–	–	0,03	[18]

(Ф) – По нашим расчётам

тически изотропной среды необходимо, чтобы при изменении F вектор \vec{K} поворачивался на некоторый угол γ . Это реализуемо с помощью секционированного фазированного излучателя ультразвука. Достоинство такого излучателя – простота изготовления, а недостаток – потеря чуть более половины мощности из-за наличия двух симметричных главных лепестков диаграммы направленности. Если сдвиг фаз между секциями $\Phi = \pi$, то угол γ пропорционален F (рис. 5) [23]:

$$\gamma \approx \frac{\Lambda}{2L_1} = \frac{F}{2VL_1}.$$

Зависимость ξ от F для АО дефлектора с фазированным излучателем определяется углом падения излучения на звуковой столб θ_i [24]:

$$\xi = \xi_1 0,1 \frac{1}{m^2 X_F^2} (\pi X_F) \operatorname{tg}^2 \sin^2 \left[\pi m \left(X_F + \frac{1}{2} \right) \right],$$

$$\theta_i = C_\theta \theta_B; \quad \theta_B \approx \frac{\lambda F_0}{2nV};$$

$$X_F = \frac{\lambda F}{2nV} \frac{L_1}{V} (F - C_\theta F_0),$$

где C_θ и X_F – безразмерные параметры, ξ_1 определяется выражением (1), а оптимальный угол θ_i зависит от количества m секций излучателя [25]:

$$\theta_i \approx \sqrt{m \frac{\lambda}{nL}}; \quad \theta_d = 0.$$

Центральная частота АО дефлектора F_d , полоса рабочих частот ΔF и число разрешённых пятен N [25] определяются следующими соотношениями:

$$F_d \approx V \sqrt{m \frac{n}{\lambda L}}; \quad \Delta F \approx 1,9 \sqrt{\frac{nV^2}{\lambda L}};$$

$$N = 1,9 \sqrt{\frac{n}{\lambda L}} D. \quad (3)$$

Оценка выигрыша от использования секционированного фазированного излучателя по сравнению с односекционным даётся выражением

$$\frac{N}{N_1} \approx \sqrt{\frac{L\lambda}{n}} \frac{F}{V} = \sqrt{m} \frac{F}{F_d}, \quad (4)$$

где $N_1 = 1,8nVD/\lambda FL$ – число разрешённых пятен при использовании односекционного излучателя.

Из (4) следует, что для увеличения N нужно увеличивать m . Однако существует два ограничения на максимальное m при заданной L : 1) технологическое, связанное с трудностью изготовления; 2) физическое, если размер секции меньше толщины излучателя ($h = V_{PZT}/2F$) и возникают сложные типы колебаний, где V_{PZT} – скорость звука в материале излучателя.

Оценим оптимальное m при использовании сжиженного SF_6 в качестве среды АО взаимодействия. Как установлено в [21], приемлема F_d около 300 кГц. При характерных значениях λ , n , L , V 130 мкм, 1,2, 8 см, 300 м/с соответственно такой F_d (≈ 288 кГц), согласно формуле (3), соответствует значение $m = 8$. Оптимальный угол $\theta_i = 5,96^\circ$. Если ширина пучка ТГц излучения будет составлять $D = 1$ см, то АО дефлектор будет характеризоваться числом $N \approx 6,5$ (3), а выигрыш N/N_1 составит около 3-х.

ТГц АО модулятор на основе сжиженного SF_6

Один из важных факторов, влияющих на эффективность АО взаимодействия в ТГц диапазоне, который ранее не учитывался, – структура акустического поля. Обычно его считают однородным и используют соотношение (1). Если же апертура D входного окна АО ячейки и ширина d излучателя различны, то ξ для пучка излучения $I_{\text{ТГц}} \propto \exp(-z^2/W^2)$ определяется как [26]

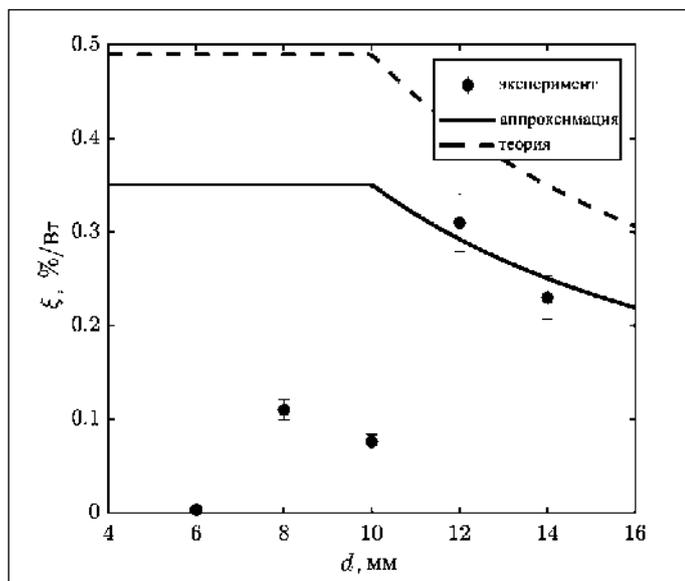
$$\xi = \begin{cases} \xi_{\text{ID}} \left(1 + \frac{\alpha_s L \theta_B}{2} \right) \exp \left(\frac{\alpha_s^2 W^2}{4} \right) \times \\ \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{d}{2W} \right) / \operatorname{erf} \left(\frac{D}{2W} \right) \right] & \text{при } d \leq D; \\ \xi_{\text{ID}} \left(1 + \frac{\alpha_s L \theta_B}{2} \right) \exp \left(\frac{\alpha_s^2 W^2}{4} \right) & \text{при } d > D, \end{cases}$$

Физические свойства сжиженных газов при $\lambda = 119$ мкм

Среда АО взаимодействия	p , бар	t , °C	ρ , кг/м ³	V , м/с	α_s , дБ/см	n	α , см ⁻¹	$M_2 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг
Хе	29	-15		350	0,6	1,46 ^(в)	0,5 ^(г)	7700
SF ₆	26	20	1420	210	1,6	1,241	0,17	21000

(в) – Видимый диапазон

(г) – Температура 0°C, давление 50 бар

Рис. 6. Зависимость эффективности АО взаимодействия от ширины излучателя ультразвука d

$$\xi_{\text{ID}} = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} \frac{M_2 P_a}{d} L \exp(-\alpha_s l),$$

где учтено затухание ультразвука на длине l от излучателя до области АО взаимодействия.

В акустооптике видимого диапазона частоты ультразвука F составляют порядка 100 МГц, что соответствует толщине излучателя $h \approx 10$ мкм. При использовании же сжиженного SF₆ из-за сильного затухания ультразвука F должна быть порядка 300 кГц, что соответствует $h \approx 6$ мм. Ширина же излучателя d должна быть сопоставима с шириной пучка излучения, которая составляет порядка 1 см [27]. Известно, что при сопоставимых d и h в излучателе возникают сложные типы колебаний, приводящие к неоднородности акустического поля. Для выявления этого эффекта был проведён цикл экспериментов по исследованию АО взаимодействия в ТГц диапазоне ($\lambda = 130$ мкм) с использованием излучателей из пьезокерамики ЦТС-19 с d от 6 до 14 мм и $L = 80$ мм (рис. 6) [26]. Горизонтальный участок на графике возникает из-за ограниченности пучка излучения апертурой входного окна АО ячейки: $D = 10$ мм. Как видно, при $d = 10, 8$ и 6 мм ξ примерно в 5–10 раз меньше, чем ожидалось в соответствии с моделью, предполагающей однородное звуковое поле. Поэтому можно сделать вывод, что на F около 300 кГц нужно использовать излучатели с $d \approx 12$ мм.

В ТГц диапазоне нашли широкое применение закрученные бесселевые пучки. Они обладают орбитальным угловым моментом, позволяя существенно увеличивать про-

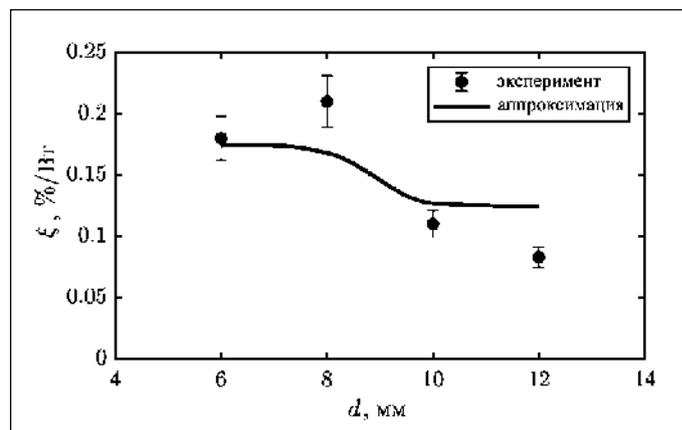


Рис. 7. Зависимость эффективности АО взаимодействия, нормированной на мощность ультразвука, от ширины электродов

пускную способность каналов связи [28]. Отличительной особенностью закрученных пучков ТГц излучения является то, что они достаточно узкие (около 2–3 мм) и нерасходящиеся на расстояниях порядка 20 см [29]. Поэтому с их использованием можно существенно повысить эффективность АО взаимодействия, если ширина ультразвуковых пучков будет также составлять несколько миллиметров. Как было установлено в [26], этого невозможно добиться уменьшением d . Другим методом генерации узких однородных звуковых пучков служит частичное покрытие электродом поверхности излучателя с обеих сторон [30]. Недавно мы провели цикл экспериментов с использованием таких излучателей на $\lambda = 130$ мкм при температурах, близких к комнатным [31]. Результаты приведены на рис. 7.

Условия эксперимента (температура t и давление p) для каждой точки на рис. 7 несколько различались, поэтому теоретическая кривая, очевидно, не отвечает соотношению $\xi \propto 1/d$. Кроме того, для всех излучателей достигнутая ξ была примерно в 3 раза меньше расчётной. Это могло быть обусловлено, в частности, низким качеством излучателей и тепловыми потерями при генерации ультразвука. Как видно из рис. 7, экспериментальные результаты качественно согласуются с моделью. Установлено, что при уменьшении ширины электрода d уровень ξ возрастает, а не убывает, как при использовании излучателя с меньшей d (рис. 6). Таким образом, при разработке эффективных АО модуляторов ТГц излучения рекомендуется использовать излучатели ультразвука, покрытые электродами частично.

Заключение

Проведён анализ развития АО методов в ТГц диапазоне и освещены современные достижения в этой обла-

сти. Эффективность АО взаимодействия в монокристаллах и неполярных жидкостях невелика и составляет сотые доли процента на 1 Вт акустической мощности. На порядок большей энергоэффективности можно добиться при использовании сжиженного инертного газа SF_6 . Дальнейшее повышение энергоэффективности возможно путём генерации ультразвука излучателями, излучающие поверхности которых покрыты электродами не полностью. Применение таких АО устройств особенно актуально для модуляции закрученных бесселевых ТГц пучков. Эффективный же АО дефлектор ТГц излучения может реализовываться с использованием секционированного фазированного излучателя ультразвука.

Дальнейшее развитие акустооптики в ТГц диапазоне, видимо, будет связано с изучением взаимодействия импульсного ТГц излучения с ультразвуковым пучком, а также с реализацией АО взаимодействия в планарных структурах. Актуальность первого из этих направлений обусловлена наличием серийных источников и приёмников импульсного ТГц излучения и их применением в обработке информации. Второе же направление может способствовать созданию более эффективных АО устройств вследствие концентрации взаимодействующих пучков в волноведущей структуре.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (тема № FFNS-2022–0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Evans G.J., Kirkby P.A., Nadella K.M.N.S., Marin B., Silver R.A.* Development and application of a ray-based model of light propagation through a spherical acousto-optic lens // *Opt. Exp.* – 2015. – Vol. 23, No. 18. – P. 23493–23510.
2. *Poon T.-C., Banerjee P.P.* Contemporary Optical Image Processing with MATLAB. – 1-st ed. – N.Y.: Elsevier, 2001. – 262 p.
3. *Antonov S.N., Filatov A.L.* Acousto-optic diffraction in paratellurite by a slow acoustic mode. Increase of diffraction efficiency of divergent light // *Tech. Phys.* – 2018. – Vol. 63, No. 6. – P. 876–880.
4. *Pichugina Y.V., Garnov S.V., Bulkin Y.N.* 2D scanning system of the acousto-optical deflector with high diffraction efficiency // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 2091. – Art.n. 012013.
5. *Bratman V.L., Litvak A.G., Suvorov E.V.* Mastering the terahertz domain: sources and applications // *Physics-Uspexhi.* – 2011. – Vol. 54, No. 8. – P. 837–844.
6. *Uchida N., Niizeki N.* Acoustooptic deflection materials and techniques // *Proc. of the IEEE.* – 1973. – Vol. 61, No. 8. – P. 1073–1092.
7. *Nikitin P.A.* Estimating the parameters of monocrystal-based acousto-optic devices for terahertz radiation control // *Bull. of the RAS.* – 2020. – Vol. 84, No. 2. – P. 180–183.
8. *Nikitin P.A.* A review of non-polar liquids as materials for bulk acousto-optic devices operating with terahertz radiation // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1421. – Art.n. 012032.
9. *Handbook of optical constants of solids / ed. by Palik E.D.* Vol. 1, 1-st ed. – N.Y.: Academic Press, 1985. – 804 p.
10. *Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I.* Modeling of gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass // *Proc. of SPIE.* – 2005. – Vol. 5742. – P. 183–194.
11. *Nikitin P.A., Voloshinov V.B.* Backward collinear acousto-optic interaction in germanium crystal in terahertz spectral range // *Phys. Proc.* – 2015. – Vol. 70. – P. 712–715.
12. *Porokhovnichenko D.L., Voloshinov V.B., Dyakonov E.A., Komandin G.A., Spektor I.E., Travkin V.D.* Application potential of paratellurite and iodic acid crystals for acousto-optics in the terahertz range // *Phys. of Wave Phenom.* – 2017. – Vol. 25, No. 2. – P. 114–118.
13. *Komandin G., Nozdrin V., Chuchupal S., Lomonov V., Pisarevskii Y., Porodinkov O., Spektor I.* Assessment of the application of paratellurite for the acousto-optical deflection of terahertz rays based on broadband spectroscopy data // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2020. – Vol. 53. – Art.n. 495102.
14. *Acoustic crystals / ed. by M.P. Shaskolskaya.* – M.: Nauka, 1982. – 632 p.
15. *Saito T., Hamada Y., Yamashita T., Ikeda M., Tanaka S.* Plastic Bragg cell in far-infrared region // *J. Appl. Phys.* – 1981. – Vol. 52, No. 8. – P. 5305–5307.
16. *Vogel T., Dodel G.* Acousto-optic modulation in the far-infrared // *Infrared Phys.* – 1985. – Vol. 25, No. 1/2. – P. 315–318.
17. *Durr W., Schmidt W.* Measurement of acousto-optic interaction in germanium in the far infrared // *Int. J. of Infrared and Millim. Waves.* – 1985. – Vol. 6, No. 10. – P. 1043–1049.
18. *Nikitin P.A., Voloshinov V.B., Gerasimov V.V., Knyazev B.A.* Acousto-optic modulation and deflection of terahertz electromagnetic radiation in nonpolar liquids // *Tech. Phys. Lett.* – 2017. – Vol. 43, No. 7. – P. 637–639.
19. *Naftal M., Miles R., Greenslade P.* THz transmission in polymer materials – A data library // *Proc. Joint 32nd Int. Conf. Infrared Millimeter Waves 15th Int. Conf. Terahertz Electron.* – 2007. – P. 819–820.
20. *Fox A.J.* Acoustooptic figure of merit for single crystal germanium at 10.6- μm wavelength // *Apl. Opt.* – 1985. – Vol. 24, No. 14. – P. 2040–2041.
21. *Durr W.* Acousto-optic interaction in gases and liquid bases in the far infrared // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.* – 1986. – Vol. 7, No. 10. – P. 1537–1558.
22. *Nikitin P.A., Gerasimov V.V., Khasanov I.S.* Temperature effects in an acousto-optic modulator of terahertz radiation based on liquefied SF_6 gas // *Materials.* – 2021. – Vol. 14, No. 19. – Art.n. 5519.
23. *Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J.L.* Planar phased-array transducers associated with specific electronic command for acousto-optic deflectors // *J. of Opt. A: Pure and Appl. Opt.* – 2007. – Vol. 9, No. 5. – P. 463–469.
24. *Gordon E.I.* A review of acoustooptical deflection and modulation devices // *Proc. of the IEEE.* – 1966. – Vol. 54, No. 10. – P. 1391–1401.
25. *Reddy G.D., Saggau P.* Fast three-dimensional laser scanning scheme using acousto-optic deflectors // *J. of Biomedical Opt.* – 2005. – Vol. 10, No. 6. – Art.n. 064038.
26. *Nikitin P.A., Gerasimov V.V.* Optimal design of an ultrasound transducer for efficient acousto-optic modulation of terahertz radiation // *Materials.* – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art.n. 1203.
27. *Kubarev V., Sozinov G., Scheglov M., Vodopyanov A., Sidorov A., Melnikov A., Veber S.* The radiation beamline of Novosibirsk free-electron laser facility operating in terahertz, far-infrared, and mid-infrared ranges // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 10. – P. 634–646.
28. *Yao A., Padgett M.* Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // *Adv. in Opt. and Photon.* – 2011. – Vol. 3, No. 2. – P. 161–204.
29. *Knyazev B.A., Choporova Yu. Yu., Mitkov M.S., Pavlyev V.S., Volodkin B.O.* Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – Vol. 115. – Art.n. 163901.
30. *Imano K.* Use of energy trapping type piezoelectric transducer to suppress lateral vibration in the transducer // *IEICE Electronics Express.* – 2019. – Vol. 16, No. 20. – P. 1–4.
31. *Никитин П.А.* Энергоэффективный акустооптический модулятор терагерцевого излучения (принята к печати в журнал «Физические основы приборостроения»).



Никитин Павел Алексеевич, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 2012 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник НТЦ УП РАН и доцент НИУ «МЭИ». Автор 6 патентов на изобретение и 25 статей в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Область научных интересов: акустика, акустооптика, поглощающие среды, терагерцевое излучение