

# **Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах**

## ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторной работы № 5  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
очной формы обучения*

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

**Устройства функциональной  
электроники в радиоэлектронных  
системах и комплексах**

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторной работы № 5  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)  
ББК 38.113я7-5

*Составитель А. И. Сукачев*

**Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах:** методические указания к выполнению лабораторной работы № 5 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. И. Сукачев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 27 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы принципов работы акустооптических дефлекторов и их проектирования. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах».

Предназначены для студентов 4 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле УФЭВРЭСиК\_УМД\_ЛР5.pdf.

Ил. 9. Табл. 3. Библиогр.: 4 назв.

УДК 721:53(073)  
ББК 38.113я7-5

**Рецензент** – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор  
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с программой курса «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

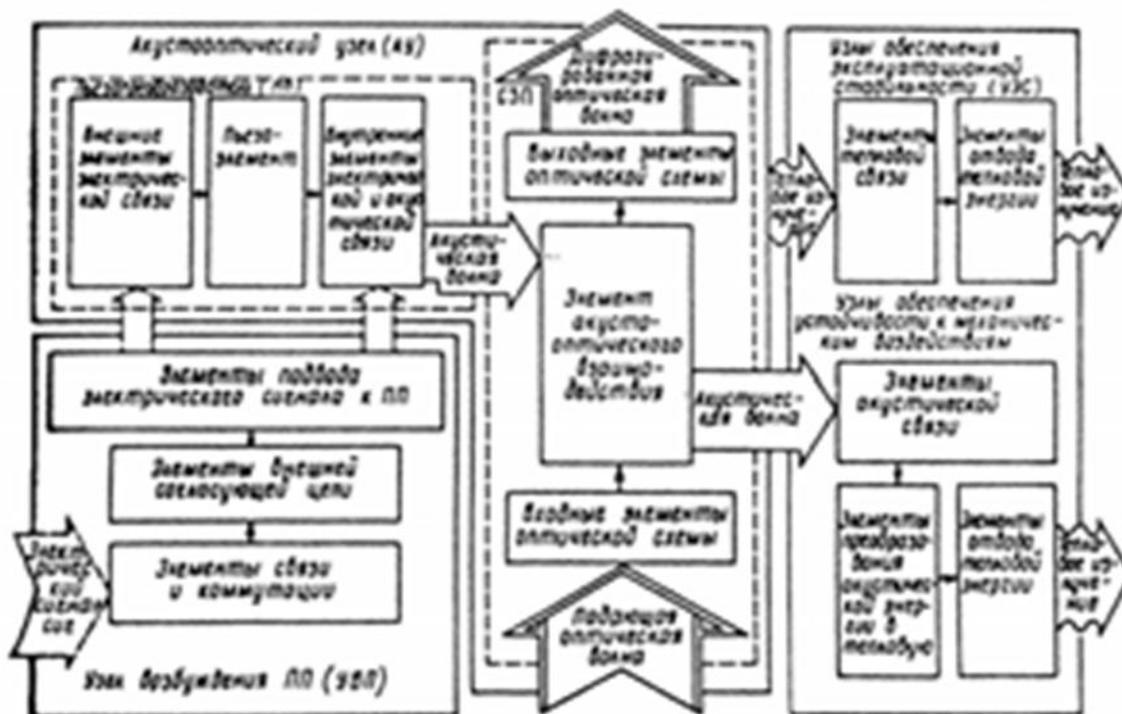
Оптические методы обработки информации находят широкое применение при решении многих сложных технических задач. К ним, в частности, относятся обработка изображений в телевизионной технике и астронавигации, создание оптических аналоговых и цифровых вычислительных машин, обработка сигналов в радиолокации, исследования природных ресурсов и так далее. Оптическая обработка радиосигналов в ряде случаев позволяет получить такие технические характеристики устройств, которые пока еще недостижимы при использовании других средств. Одним из видов таких устройств являются акустооптические (АО) устройства. Эти устройства используются для свёртки и нахождения корреляционных функций, анализа спектра частот радиосигналов и оптической спектрометрии, создания модуляторов света, в том числе внутриврезонаторных затворов для лазеров. АО пространственные модуляторы света позволяют обрабатывать не только одномерные, но и двумерные сигналы, в том числе изображения. Акустооптика нашла применение при создании устройств для обработки сигналов радиолокаторов и систем дальней радиосвязи. Возможности акустооптики особенно ярко проявляются в интегральной оптике при использовании ПАВ.

Практическая реализация потенциальных возможностей АО устройств обработки сигналов в значительной степени определяется характеристиками используемых в них модуляторов. Разработка их является сложной комплексной научно-технической и технологической задачей.

Под термином «модуляция» понимают процесс изменения одного или нескольких параметров несущей в соответствии с изменениями параметров передаваемого сигнала. Параметры, изменяемые в процессе модуляции, называются информационными. В когерентном оптическом излучении ими являются независимые параметры плоской монохроматической волны: амплитуда напряженности поля, частота изменения во времени, начальная фаза колебания, вид поляризации, направление вращения поляризации, направление распространения волны. В полностью когерентном оптическом излучении (лазерном) они могут изменяться во времени и в пространстве.

По типу изменяемого информационного параметра модуляторы когерентного оптического излучения могут быть разделены на амплитудные, частотные, фазовые, поляризационные и направления. Модуляторы направления называют дефлекторами оптического излучения.

На рисунке 1.1 представлена структурная схема акустооптического модулятора (АОМ).



**Рис. 1.1.** Структурная схема акустического модулятора

В составе АОМ можно выделить следующие функциональные узлы: АО узел (АОУ), узел возбуждения пьезопреобразователя (УВП), узлы обеспечения эксплуатационной стабильности (УЭС).

Определяющим большинство важнейших технических характеристик АОМ является АОУ. Он состоит из светозвукопровода (СЗП), пьезопреобразователя (ПП) и акустического поглотителя. СЗП включает элементы акустической схемы, входной и выходной оптических схем. ПП состоит из пьезоэлектрического элемента и элементов связи. Последние делятся на элементы, осуществляющие акустический контакт с СЗП, и элементы, служащие для подвода электрической энергии. Акустический поглотитель выполняет функции вывода акустической энергии из СЗП и состоит из элементов преобразования акустической энергии в тепловую и вывода ее за пределы лазерного модуляционного устройства.

## 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ДЕФЛЕКТОРЫ 1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – ознакомиться с принципом действия, устройством и основными расчетными соотношениями для АО дефлектора.

### 1.2. АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В общем случае свет, распространяющийся в среде, в которой присутствует ультразвуковая волна, испытывает дифракцию. Это обусловлено возникновением в среде под воздействием волны упругих деформаций,

приводящих к периодическому изменению ее показателя преломления  $n$ . Образующаяся структура эквивалентна дифракционной решетке с периодом, равным длине волны звука  $\lambda_a$ . Управляемое изменение амплитуды или частоты (длины волны) ультразвука соответственно изменяет характер процесса дифракции света на ультразвуке, создавая возможность управления амплитудой, фазой и направлением пучка света, проходящего через среду. В зависимости от соотношения между длинами волн света  $\lambda_0$ , звука  $\lambda_a$  и длиной их взаимодействия  $L$  различают два типа дифракции: Рамана–Ната и Брэгга. Дифракция Рамана–Ната имеет место при низких частотах звука (ниже нескольких десятков мегагерц) и малых  $L$ , когда соблюдается условие

$$\frac{\lambda_0 L}{n \lambda_a^2} \leq 1. \quad (1.1)$$

В этом случае резонансная дифракция наблюдается при нормальном падении света на звуковой пучок. Световая волна проходит через звуковой пучок без отражения, испытывая периодическое изменение фазы под действием ультразвука. Угловое направление дифракционных максимумов относительно нулевого (соответствующего прямо прошедшему свету) определяется формулой

$$\sin \theta_m = \frac{m \lambda_0}{n \lambda_a}, \quad (1.2)$$

где  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  – порядок дифракционного максимума;  $\theta_m$  – угловое направление на дифракционный максимум  $m$  – го порядка.

Частота света в  $m$ -м максимуме сдвинута относительно частоты  $\omega_0$  падающего света на величину, пропорциональную акустической частоте  $\omega_a$ , и равна  $\omega_0 \pm m \omega_a$ .

При высокочастотном звуке и широком акустическом пучке, когда выполняется условие

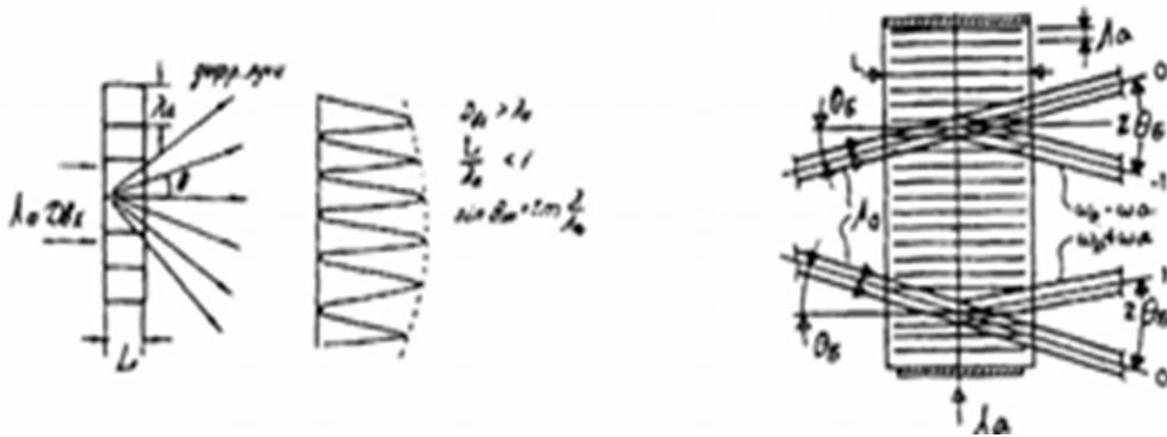
$$\frac{\lambda_0 L}{n \lambda_a^2} > 1, \quad (1.3)$$

имеет место дифракция Брэгга. Дифракционный спектр в этом случае состоит из двух максимумов, соответствующих значениям  $m = 0$  и  $m = \pm 1$  (в зависимости от того, под острым или тупым углом падает свет). Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющим условию Брэгга

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0}{2 \lambda_a \cdot n}, \quad (1.4)$$

где  $\theta_B$  – угол Брэгга.

Схема дифракции света на ультразвуке представлена на рисунке 1.2.



**Рис. 1.2.** Схема дифракции света на ультразвуке: а) дифракция в области Рамана-Ната; б) дифракция в области Брэгга: смещение дифракционного пучка по частоте вниз (вверху) и вверх (внизу).

Для широкополосных акустооптических устройств режим брэгговской дифракции позволяет достичь лучших характеристик, следовательно предпочтителен.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Взаимодействие света с акустическими волнами определяется несколькими основными параметрами. Один из параметров, определяющий характер взаимодействия – параметр Кляйна–Кука  $Q_K$ :

$$Q_K = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\lambda_a^2} \quad (1.5)$$

Таким образом, условие брэгговской дифракции запишется как  $Q > 7$ , дифрагированный свет в этом случае в основном сосредоточен в первом порядке.

Интенсивность дифрагированного света  $I_1$  определяется из выражения:

$$\frac{I_1}{I_0} = \eta \left\{ \frac{\sin \left[ \eta + \left( \frac{\Delta k L}{2} \right)^2 \right]^{1/2}}{\left[ \eta + \left( \frac{\Delta k L}{2} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}^2 \quad (1.6)$$

где  $I_1$  и  $I_0$  – интенсивности дифрагированного и падающего световых пучков соответственно;  $\Delta k$  – модуль разности векторов распространения падающей и дифрагированной волн.

Параметр  $\eta$  определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2} M_2 \frac{L}{H} P_a, \quad (1.7)$$

где  $M_2$  – коэффициент акустооптического дифракционного качества материала;  $H$  – высота акустического пучка;  $P_a$  – акустическая мощность.

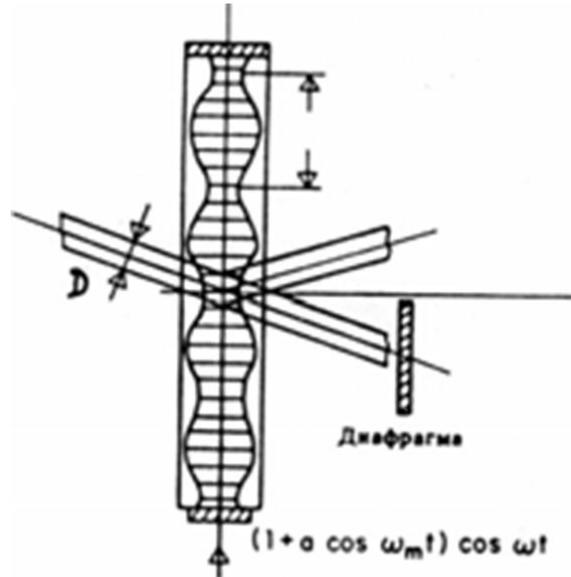
При  $\Delta k = 0$  (фазовый синхронизм) для интенсивности дифрагированного света имеем

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2(\eta^{1/2}), \quad (1.8)$$

В случае малых  $\eta$  получаем  $I_1/I_0 = \eta$ , так что  $\eta$  является дифракционной эффективностью устройства.

### 1.3.1. МОДУЛЯТОРЫ

Схема работы модулятора представлена на рисунке 1.3.



**Рис. 1.3.** Схема работы АО модулятора в режиме дифракции Брэгга

Полоса частот  $\Delta f$  и быстродействие модулятора определяются из формулы:

$$\Delta f \approx \tau^{-1} \approx \frac{\vartheta \cos \theta_B}{D}, \quad (1.9)$$

где  $\vartheta$  – скорость распространения акустической волны;  $D$  – апертура светового пучка. С другой стороны, из (1.4) получаем

$$\Delta f = \frac{2\vartheta n \cos \theta_B}{\lambda_0} \Delta \theta_B. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) показывает, как должен измениться угол Брэгга при изменении частоты на  $\Delta f$  при сохранении условий синхронизма. Это изменение угла обеспечивается за счет дифракционной расходимости акустического пучка, которая по уровню 4 дБ составляет

$$\delta Q_a = \frac{\lambda_a}{L}, \quad (1.11)$$

полагая в (5.10)  $\Delta \theta_B = \delta \theta_a$ , получаем для апертуры акустического пучка (длины преобразователя)

$$L = \frac{2\vartheta^2 n \cos \theta_B}{\lambda_0 f_0 \Delta f}, \quad (1.12)$$

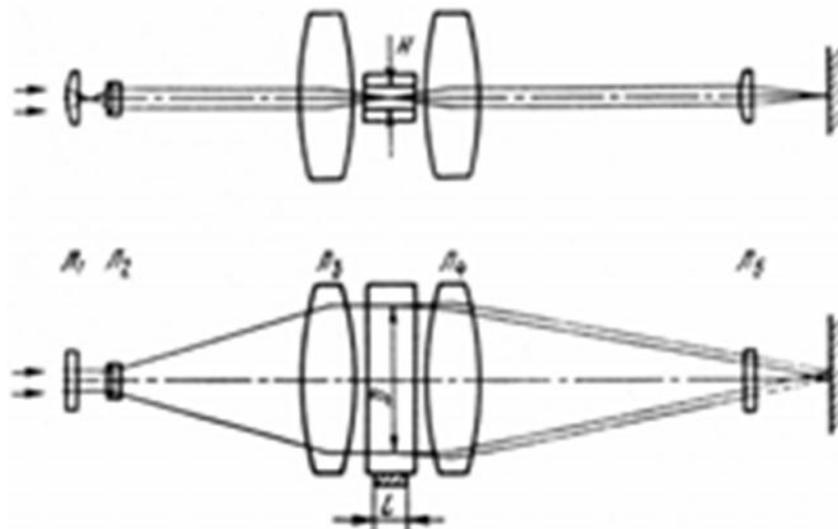
где  $f_0$  – центральная частота устройства.

Обычно для оптимальной частоты выбирается значение

$$f_0 \approx 2 \left( \frac{n\vartheta^2}{\lambda_0 L} \right)^{1/2} \approx \frac{2\Delta f}{\cos \theta_B} \quad (1.13)$$

### 1.3.2. ДЕФЛЕКТОРЫ

Схема работы АО дефлектора представлена на рисунке 1.4



**Рис. 1.4** Схема работы АО дефлектора с формирующей оптической системой.

Акустооптические дефлекторы (АОД) – отклоняющие устройства. Отклонение оптического луча от первоначального направления распространения в результате АО дифракции может решать две основные задачи:

а) переключение направления распространения на угол дифракции, который при дифракции Брэгга определяется из (1.4) как

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0 f}{2n\vartheta}, \quad (1.14)$$

где  $f$  – частота;  $\vartheta$  – скорость звуковых волн.

б) сканирование лучом в пространстве с монотонным изменением направления луча при монотонном изменении акустической частоты. Зависимость изменения угла распространения оптического звука  $\Delta\theta_B$  от частоты звука  $\Delta f$  получим из (1.10)

$$\Delta\theta_B = \frac{\lambda_0 \Delta f}{2\vartheta n \cos \theta_B}. \quad (1.15)$$

В режиме дефлектора работают и анализаторы спектра частот, в которых информация о спектре акустических частот получается в виде углового распределения оптической интенсивности.

Важнейшей характеристикой дефлектора является его разрешающая способность  $N$ , которая определяется как число отдельных разрешимых положений луча в интервале углов отклонения  $\Delta\theta_B(f_{\max})$ .

Если для разрешения соседних положений луча он должен быть отклонен на угол  $\Delta\varphi$ , то  $N = 2\Delta\theta_B / \Delta\varphi$ . Минимальный угол отклонения, позволяющий разрешить два соседних положения луча, определяется дифракционной расходимостью и может быть записан как  $\Delta\varphi = \frac{\lambda_0}{nD}$ , где  $D$  – апертура

оптического луча. С учетом (1.9) и (1.15) получим

$$N = \tau \Delta f, \quad (1.16)$$

т.е.  $N$  равно произведению времени прохода акустической волны через апертуры оптического пучка  $\tau$  на ширину полосы  $\Delta f$  и для  $N > 1$  полоса должна быть больше, чем быстродействие  $\tau^{-1}$ . Для высококачественных устройств необходимо, чтобы  $N$  было как можно больше, однако величина  $N$  ограничена геометрическими факторами и акустическим затуханием.

Первым геометрическим фактором является максимально допустимая длина акустооптического дефлектора  $D$ . Увеличивая  $D$ , мы уменьшаем быстродействие. Если учесть, что  $\Delta f \approx f_0 / 2$ , т. е. относительная полоса максимальна, выражение (1.16) запишется как

$$N \leq \frac{D}{2\lambda_a}. \quad (1.17)$$

Другое ограничение числа разрешенных элементов можно установить, рассматривая геометрию расходимости пучка. Если рассматривать  $D$  как расстояние в ближней зоне до точки с половинным уровнем мощности (см. лаб. раб. №2), то связь  $D$  с длиной преобразователя  $L$  определяется как  $D = L^2 / 2\lambda_a$ . Учтя (1.5) и (1.8) получим

$$N \leq \left( \frac{\eta Q}{4\pi} \right)^2 \lambda_a^2. \quad (1.18)$$

Это ограничение связано с возможностью увеличения  $N$  с увеличением  $\Delta f$ , что ведет к увеличению  $f$  (требует соответствующего уменьшения  $L$ ) и росту потребляемой мощности.

Третьим принципиальным ограничением является затухание акустической волны в дефлекторе, которое также можно представить как функцию  $\lambda_a$ . Если затухание на частоте 1 ГГц, выраженное в децибелах на единицу длины, равно  $a$ , то затухание на 3дБ будет соответствовать

$$D \leq \frac{3}{a} \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_{a1}} \right)^2, \quad (1.19)$$

где  $\lambda_{a1}$  - длина акустической волны на частоте 1 ГГц. Для  $N$  получим в этом случае

$$N \leq \frac{1,5}{a\lambda_{a1}^2} \lambda_a. \quad (1.20)$$

Число разрешимых элементов, ограниченное этими тремя независимыми параметрами, показано на рисунке 1.5 в функции длины акустической волны.

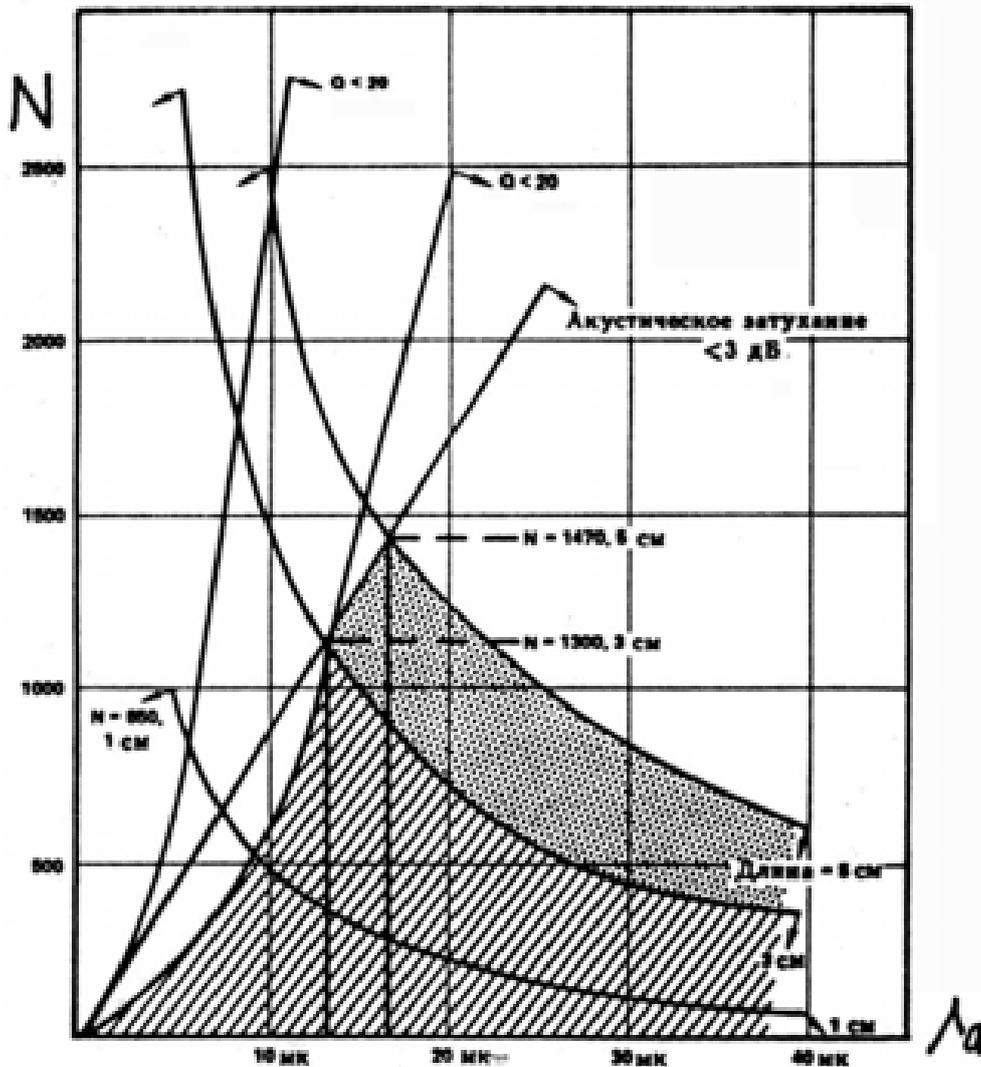
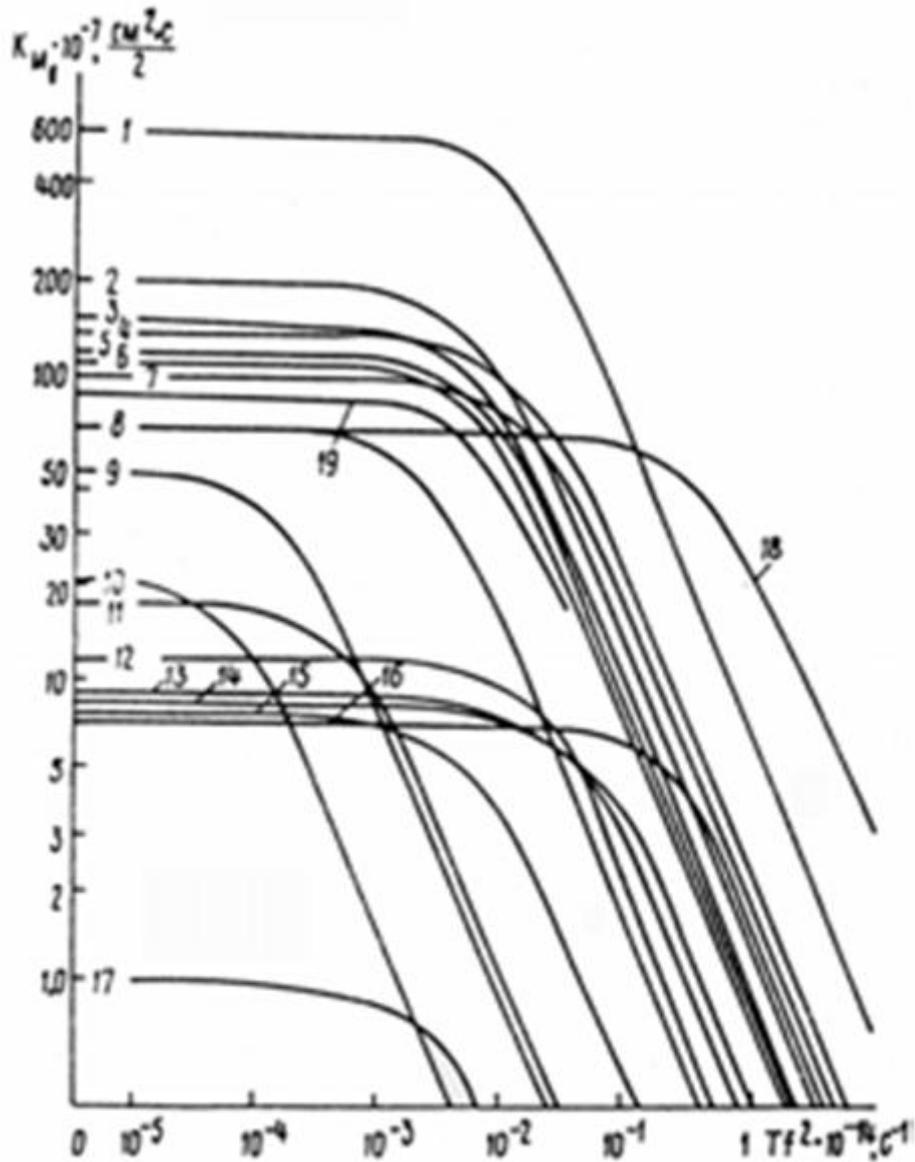


Рис. 1.5. Число разрешимых элементов для кристалла молибдата свинца



$T, \text{мкс}$	$f, \text{ГГц}$						
1	0,0315	0,100	0,316	1	3,16	10	31,6
2	0,02236	0,0707	0,2236	0,707	2,236	7,07	22,36
3	0,0141	0,0447	0,141	0,447	1,41	4,47	14,1
10	0,010	0,0316	0,100	0,316	1	3,16	10
20	0,007	0,02236	0,0707	0,2236	0,707	2,236	7,07
50	0,0045	0,0141	0,0447	0,141	0,447	1,41	4,47
100	0,0032	0,010	0,0316	0,100	0,316	1	3,16

**Рис. 1.6.** Номограмма для выбора материала СЗП: 1 - GaP  $\perp$  L [100]; 2 - TeO<sub>2</sub> || L[001]; 3 - TeO<sub>2</sub>  $\perp$  L[001]; 4 - GaP произвольная S [100]; 5 - PbMoO<sub>4</sub>  $\perp$  L[001]; 6 - PbMoO<sub>4</sub> || L[001]; 7 -  $\alpha$ -HfO<sub>3</sub>[100]L[001]; 8 - TeO<sub>2</sub>O [001]S[110]; 9 - H<sub>2</sub>O; 10 - СТФ-2; 11 - Тф-10; 12 - SiO<sub>2</sub> кристаллический [001] L [100]; 13 - SiO<sub>2</sub> – кри-сталлический  $\perp$  L[001]; 14 - LiNbO<sub>3</sub>  $\perp$  S[001]; 15 - SiO<sub>2</sub> плавный – L; 16 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> || L[100]; 17 - SiO<sub>2</sub> плавный, произвольная S; 18 - LiNbO<sub>3</sub>[011] L [100]; 19 - NaBi {(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[001]L[001]}

Следует отметить, что максимальное число разрешимых положений пучка соответствует наинизшей точке пересечения кривых, описываемых соотношениями (1.17), (1.18) и (1.20). Из всего сказанного следуют два вывода.

1. Для дефлектора разрешающая способность и полоса пропускания являются характеристиками столь же важными, как и дифракционная эффективность.

2. В отличие от АО модулятора дефлектор является широкоапертурным прибором, так как увеличение апертуры приводит к уменьшению дифракционной расходимости оптического луча и позволяет увеличить разрешающую способность.

#### 1.4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО УЗЛА

Расчет электроакустического тракта акустооптического устройства (АОУ) обязательно включает выбор материалов СЗП и ПП.

Основными критериями при выборе материала СЗП для сигнала с заданными параметрами являются:

- диапазон оптической прозрачности;
- допустимый уровень искажений спектра сигнала;
- акустооптическая эффективность;
- габаритные размеры;
- технологичность.

Одним из важнейших критериев качества при выборе материала СЗП АОУ обработки информации является эффективность для сигнала с заданными параметрами, определяемая из выражения (1.7)

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho \vartheta^3} \cdot \frac{10^{-18} c^3}{г} \quad (1.21)$$

где  $n$  – показатель преломления;  $p$  – упругая константа;  $\rho$  – плотность материала СЗП;  $\vartheta$  – скорость акустических колебаний.

$M_2$  – материальная константа, которая характеризует внутреннюю эффективность дифракции независимо от геометрии взаимодействия и называется коэффициентом АО дифракционного качества материала.

В зависимости от конкретных применений на первый план могут выходить различные характеристики АОУ: разрешающая способность, полоса пропускания и т.д. Это может усиливать или ослаблять влияние различных характеристик материала на АО эффективность. Поэтому при различных применениях материала комбинация величин, характеризующая АО эффективность, может меняться и для характеристик АО эффективности материала в конкретном устройстве (модулятор, дефлектор, ...) используют комбинацию величин, отличающуюся от  $M_2$ .

Для удобства анализа выражение (1.7) перепишем, учтя, что акустическая мощность  $P_a$  затухает, проходя по СЗП с коэффициентом  $\alpha = \alpha_0 f^2$ , где  $\alpha_0$  – частотно – независимый коэффициент затухания акустической волны, Нп  $c^2/см$ .

$$\Theta = \frac{\eta}{P_a} = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2} \cdot \frac{L}{M} \cdot M_2 \cdot K_M, \quad (1.22)$$

где  $K_M$  – безразмерный частотно – зависимый множитель.

$$K_M = \frac{[1 - \exp(-A\tau f^2)]}{A_0 \tau f^2}, \quad (1.23)$$

содержащий только параметр материала  $A_0$  и входного сигнала  $\tau f^2$ , по существу является нормированной частотной характеристикой АО эффективности материала, в то же время характеризуя частотную зависимость акустической мощности, участвующей в АО взаимодействии.

$$A_0 = 2a_0 \vartheta \cdot 10^{-14}, \text{ Нп} \cdot \text{с}.$$

Для дефлектора, как уже говорилось, значение  $N$  и  $\Delta f$  также важно как и  $\eta$ . Поэтому, учтя (1.5), выражение (1.22) запишется как

$$\Theta = M_1 \cdot K_M \frac{\pi}{4\lambda_0^2 f_B^2} \cdot \frac{Q_K}{H}, \quad (1.24)$$

где

$$M_1 = \frac{n^7 p^2}{\rho \vartheta} \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Г}^{-1} \quad (1.25)$$

- параметр дифракционного АО качества материала, учитывающий и полосу пропускания.

Обозначим  $M_1 \cdot K_M = K_{M1}$ . При создании двухкоординатных дефлекторов в качестве параметра АО качества материала используют величину

$$M_3 = \frac{n^7 p^2}{\rho \vartheta^3}, \text{ см} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Г}^{-1} \quad (1.26)$$

В таблице 1.1 приведены параметры некоторых из наиболее перспективных материалов, используемых для изготовления СЗП для АОУ. Все параметры в таблице соответствуют длине волны света  $\lambda_0 = 0,633$  мкм.

Таблица 1.1

Параметры материалов светозвуков проводов АОМ ( $\lambda_0 = 0,633$  мкм)

№ п/п	Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Оптическая волна			Акустическая волна				Акустооптическое взаимодействие				
			n	E	N	V	V, 10 <sup>3</sup> см/с	A <sub>0</sub> , 10 <sup>-14</sup> Нп·с	Tf <sub>a</sub> <sup>2</sup> , 10 <sup>14</sup> 1/(Нп·с)	M <sub>1</sub> , 10 <sup>-7</sup> (см <sup>2</sup> ·с)/Г	M <sub>2</sub> , 10 <sup>-18</sup> с <sup>3</sup> /Г	M <sub>3</sub> , 10 <sup>-12</sup> (см <sup>2</sup> ·с)/Г	Э, 10 <sup>-3</sup> %/мВт	q, (ГГц) <sup>-2</sup> /мм
1	Вода	1.0	1.3		—	—	1	519	0.0002	47.90	160.0	32.15	197.0	134
2	ТФ-10	4.7	1.8	—	—	—	3	170	0.0006	18.50	7.50	5.00	9.23	161
3	СТФ-2	6.1	2.1	—	—	—	3	0.0142	0.00007	22.10	7.50	5.97	9.23	135
4	Плавленн ый кварц	2.2	1.4	⊥	—	—	5	10.0164	0.006	8.10	1.56	1.36	1.92	77
5	SiO <sub>2</sub>	2.65	1.5		0	0	6	261	0.032	9.14	1.48	1.45	1.82	54
6	α-ННО <sub>3</sub>	5.0	1.9	100	0	0	2	39	0.017	101.4	85.80	41.56	306.5	336
7	NaBi(Mo O <sub>4</sub> )	5.7	2.2	001	0	0	4	56	0.009	86.60	23.70	21.54	29.20	109
8	TeO <sub>2</sub>	6.0	2.2	Кр.		1	0	110	0.002	68.20	796.0	110.8	979.0	460
9	TeO <sub>2</sub>		2.4	001	0	0	4	145	0.006	146.0	34.30	34.76	42.20	93
10	TeO <sub>2</sub>			⊥	0	0	4	145	0.006	194.7	25.80	46.36	31.70	93
11	PbMoO <sub>4</sub>	6.9	2.3	⊥	0	0	3	125	0.008	112.8	35.90	31.07	44.16	127
12	PbMoO <sub>4</sub>		2.2		0	0	3	125	0.008	106.9	35.90	29.45	44.16	130
13	GaP	4.1	3.3	⊥	1	1	6	87	0.011	587.8	44.50	93.1	54.70	30
14	GaP			Пр. вол.		1	4	57	0.017	133.0	23.56	32.2	29.0	70
15	LiNbO <sub>3</sub>	4.6	2.2	011	1	1	6	2.2	0.440	66.70	7.02	10.15	8.63	42
				⊥		0	3	21	0.046	8.62	2.92	2.4	3.59	135
16	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	1.7		1	1	1	5	0.197	7.67	0.359	0.697	0.44	18

Акустическую и оптическую волны характеризуют:  $E$  - вектор поляризации напряженности электрического поля,  $N$  - вектор направления распространения акустической волны,  $V$  - вектор смещения в акустической волне.

В таблице, кроме общепринятых, приводятся также параметры  $q$  и  $\mathcal{E}$ , позволяющие оперативно получить количественную оценку ряда характеристик, представляющих практический интерес при проектировании АОУ:

$$Q_K = q f_B^2 L \quad (1.27)$$

$$2\Delta f_{0,5} \approx 11,3 f_B / Q_K \quad (1.28)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\eta \cdot H}{P_a \cdot L} \approx 1,23 \cdot 10^{-3} M_2 \quad (1.29)$$

В формуле (1.27)  $q$  – параметр Кляйна – Кука, нормированный относительно частоты Брэгга  $f_B$  в гигагерцах и длины АО взаимодействия  $L$  в миллиметрах.

В соотношении (1.28)  $2\Delta f_{0,5}$  - абсолютная ширина полосы пропускания пополовинному уровню частотной характеристики АО взаимодействия типа  $\sin x/x$ , характерной для режима Брэгга.

Параметр  $\mathcal{E}$  в формуле (1.29) – АО эффективность в процентах на один милливатт акустической мощности, нормированная на коэффициент формы внешнего электрода ПП  $L/H$ .

На рисунке (w) изображена номограмма в виде семейства характеристик, построенных в соответствии с формулой (1.24) для ряда АО материалов, параметры которых представлены в таблице 1.1. По этой номограмме с учетом заданных параметров сигнала (длительности, средней частоты  $f_0$ , ширины полосы  $\Delta f$ ) и допустимых уменьшений нормированной электрооптической эффективности  $K_{М1}$  можно выбрать материал СЗП.

ПП и методы его крепления к АО среде играют существенную роль при создании АОУ. В таблице 1.2 приведены типичные материалы для преобразователей и их характеристики.

Таблица 1.2

### Материалы для преобразователей

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Тип волны	Ориентация	$K_{эм}$	$\epsilon$	Акустический импеданс, $\times 10^5$ г/см <sup>3</sup>
Ниобат бария-натрия $Ba_2NaNb_5O_{15}$	5,35	Продольная	Z	0,57	32	33,3
		Сдвиговая	Y	0,25	227	19,8

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Тип волны	Ориентация	$K_{ЭМ}$	$\epsilon$	Акустический импенданс, $\times 10^5$ г/см <sup>3</sup>
Кварц SiO <sub>2</sub>	2,65	Продольная	X	0,098	4,58	15,2
		Сдвиговая	Y	0,137	4,58	10,2
Ниобат лития LiNbO <sub>3</sub>	4,65	Продольная	36°Y	0,49	38,6	33,9
		Сдвиговая	163°Y	0,62	42,9	20,8
		Сдвиговая	X	0,68	44,3	22,3
Танталат лития LiTaO <sub>3</sub>	7,46	Продольная	47°Y	0,29	42,7	55,2
		Сдвиговая	X	0,44	42,6	31,4
Иодат лития LiIO <sub>3</sub>	4,5	Продольная	Z	0,51	6	18,5
		Сдвиговая	Y	0,6	8	11,3
Окись цинка ZnO	5,68	Продольная	Z	0,27	8,8	36,2
		Сдвиговая	39°Y	0,35	8,6	18,4
Сульфид кадмия CdS	4,82	Продольная	Z	0,15	9,5	21,7
		Сдвиговая	40°Y	0,21	9,3	10,1
Германат висмута Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>	9,22	Продольная	(111)	0,15	38,6	30,4
		Сдвиговая	(110)	0,23	38,6	16,2

При выборе материала для пьезопреобразователя основным критерием является коэффициент электромеханической связи  $K_{ЭМ}$ , так как АО устройства должны иметь довольно высокие рабочие мощности, что требует высокой эффективности возбуждения акустической волны в среде и широкой полосы частот.

Пьезопреобразователи для АОУ изготавливаются в виде пластинок с толщиной, равной половине длины звуковой волны. При относительно простой технологии изготовления полуволновых толщин удовлетворительные характеристики имеют ПП:

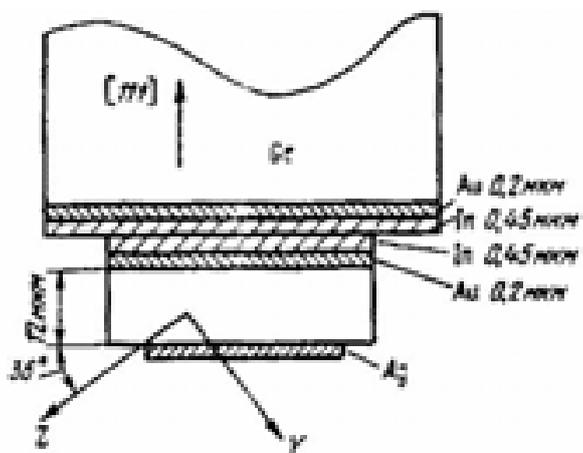
на частотах до 30 МГц – из пьезокерамики ЦТС;

на частотах 0,01...0,8 ГГц - LiNbO<sub>3</sub>; 0,5...3,5 ГГц – плёнка ZnO.

ПП связан с СЗП и источником электрического сигнала элементами акустической и электрической связи, которые должны иметь малые диссипативные потери – акустические, омические и диэлектрические, а также по возможности одинаковые акустические импедансы  $Z_i = \rho_i V_i$ , где  $\rho_i$  – плотность материала.

Среди различных способов соединения пьезокристалла со звукопроводом наиболее перспективным является вакуумная сварка, использующая в качестве связующего материала индий. Достаточно эффективны клеевые соединения с помощью эпоксидной смолы, но они обеспечивают необходимую полосу только на низких частотах (до 100 МГц). Их единственное преимущество перед индиевым соединением – низкая стоимость, связанная с отсутствием вакуумной технологии.

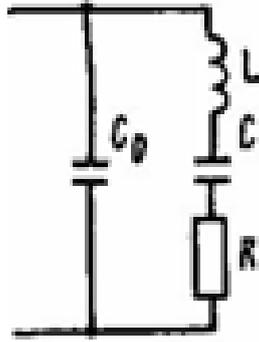
Элемент акустической связи чаще всего осуществляет и электрическую связь с источником сигнала. Для этого создают многослойные структуры, в которых используются In и хорошо проводящие металлы Cu, Al, Ag, Au, так как непосредственно использовать In в качестве одного из электродов нельзя из-за его малой электропроводности и низкой механической прочности. Типичный преобразователь на частоту 300 МГц изображен на рисунке 1.7, СЗП в нём из монокристаллического германия, а ПП – из ниобата лития. Конструкции на поверхностных акустических волнах аналогичны рассматриваемым в работе № 1.



**Рис. 1.7.** Схематическое изображение акустооптического элемента с преобразователем, изготовленным методом холодной вакуумной сварки

## 1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПП

Частотная характеристика электрического входного сопротивления акустически нагруженного ПП вблизи частоты полуволнового резонанса с достаточной точностью аппроксимируется частотной характеристикой входного сопротивления четырехэлементного двухполюсника, показанного на рисунке 1.8.



**Рис. 1.8.** Эквивалентная схема ПП АО устройства

В этой схеме  $C_0$  – статическая емкость ПП; последовательный  $LCR$  – контур ха характеризует процесс колебания механической энергии в системе электроды – пьезоэлемент – акустический связующий слой – светозвукопровод;  $R$  – сопротивление, моделирующее поглощение активной мощности ПП. При отсутствии диссипативных потерь в ПП это сопротивление характеризует активные потери, связанные с излучением акустической волны в светозвукопровод. Резонансная частота  $LCR$  – контура соответствует резонансной частоте ПП при постоянстве напряженности электрического поля в пьезоэлектрике. Связь между параметрами эквивалентной схемы выражается зависимостями:

$$K = \frac{C}{C_0}, \quad (1.30)$$

где  $K$  – коэффициент электрической связи, без учёта диссипативных потерь в элементах ПП определяется по формуле

$$K = \frac{K_{ЭМ}^2}{1 - K_{ЭМ}^2}. \quad (1.31)$$

Добротность последовательного  $LCR$  – контура

$$Q \approx \frac{1}{\omega_0 CR} \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Z_n}{Z} \quad (1.32)$$

где  $Z_n$  и  $Z$  – волновые акустические сопротивления соответственно ПП и СЗП  $L$  определяется из формулы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC} \quad (1.33)$$

## 1.6. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Наиболее существенными факторами, влияющими на общую частотную зависимость энергетического коэффициента передачи АОД при возбуждении его генератором электрического сигнала с постоянной мощностью в согласованной нагрузке, являются:

1. Частотная зависимость мощности акустической волны, излучаемой в среду АО взаимодействия. Её характеристики без учета диссипативных потерь определяются параметрами электрического входного сопротивления ПП и цепи, согласующей его с генератором электрического сигнала. Для оптимальной полосовой двухзвенной согласующей цепи типа Чебышева, схема которой изображена на рисунке, эта зависимость имеет вид

$$P_a = P_0(1 - |\Gamma|^2) = P_0 K_{\text{СЦ}}(K, Q, F), \quad (1.34)$$

где  $|\Gamma|$  - модуль коэффициента отражения в сечении генератор – согласующая цепь;

$$|\Gamma|^2 = \frac{\left[ Q\sqrt{K} - 1 - \frac{1}{Q\sqrt{K}} \left( F - \frac{1}{F} \right)^2 \cdot Q^2 \right]^2 + \left( F - \frac{1}{F} \right)^2 \cdot Q^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{Q\sqrt{K}} \right)^2}{\left[ Q\sqrt{K} + 1 - \frac{1}{Q\sqrt{K}} \left( F - \frac{1}{F} \right)^2 \cdot Q^2 \right]^2 + \left( F - \frac{1}{F} \right)^2 \cdot Q^2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{Q\sqrt{K}} \right)^2},$$

$P_a$  - акустическая мощность в СЗП;  $P_0$  - мощность генератора в согласованной нагрузке;  $K_{\text{СЦ}} = 1 - |\Gamma|^2$  - энергетический коэффициент передачи согласующей цепи;  $Q$  - добротность LCR – контура (1.32);  $K$  - коэффициент электрической связи (1.31);  $F = \frac{f}{f_0}$  - относительная частота.

2. Частотная зависимость АО эффективности, определяемая механизмом АО взаимодействия (1.5, 1.6, 1.7):

$$K_{a0}(Q_K, p_B, F) = \left\{ \frac{\sin \left[ 0,25 Q_K (p_B^2 F^2 - p_B F) \right]}{0,25 Q_K (p_B^2 F^2 - p_B F)} \right\}^2 \quad (1.35)$$

где  $K_{a0}$  - коэффициент АО эффективности;  $Q_K$  - параметр Кляйна – Кука (1.5);  $p_B = \frac{f_0}{f_B}$  - обратная относительная расстройка частоты Брэгга.

Частотная зависимость АО эффективности, определяемая затуханием акустической волны в СЗП (1.19, 1.23)

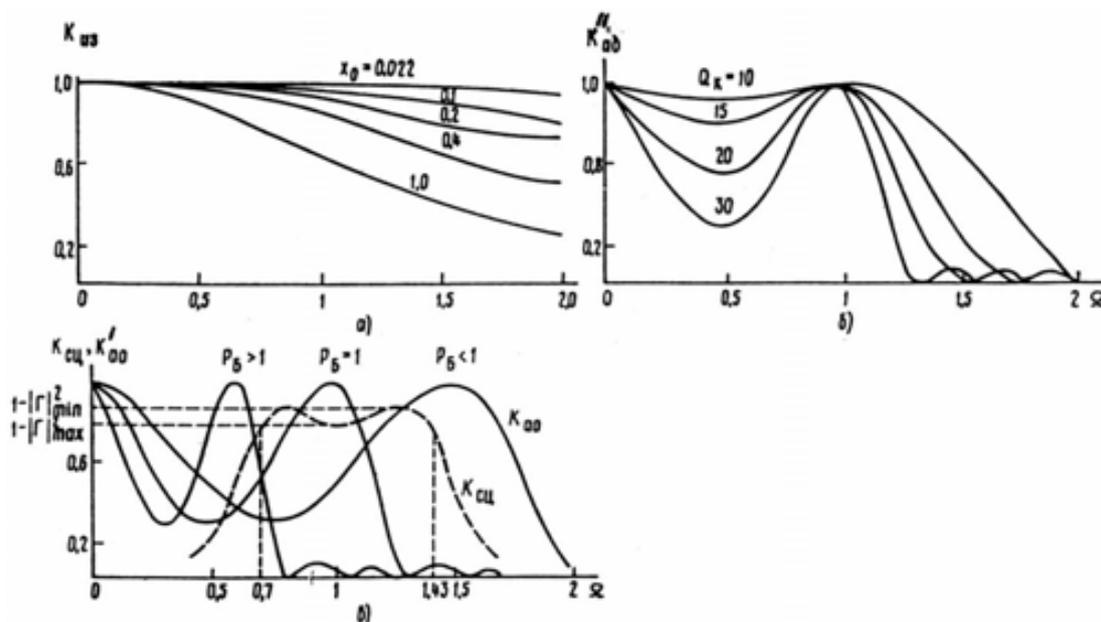
$$K_{A3}(x_0, F) = \left[ 1 - \exp(-x_0 F^2) \right] / x_0 F^2, \quad (1.36)$$

где  $x_0 = 2\alpha_0 \vartheta f_0^2 \tau = A_0 f_0^2 \tau$ ;  $\alpha_0$  - затухание акустической волны в СЗП,  $\text{Нп} \cdot \text{с}^2 / \text{см}$ ;  $\vartheta$  - скорость акустической волны в СЗП,  $\text{см} / \text{с}$ ;  $\tau$  - длительность обрабатываемого сигнала, с.

Энергетическая эффективность АОД количественно оценивается отношением интенсивности света в полезном дифракционном порядке к интенсивности падающего на АОД света и акустической мощности в СЗП (1.24):

$$\Xi = 100 I_1 / P_a I_0, \quad (1.37)$$

где  $\mathcal{E}$  – в процентах на единицу мощности. Семейства частотных зависимостей основных энергетических коэффициентов передачи изображены на рисунке 1.9.



**Рис. 1.9.** Частотные зависимости нормированной электрооптической эффективности, обусловленные различными факторами: а) затуханием акустической волны в СЗП; б) механизмом акустооптического взаимодействия; в) расстройкой относительной частоты Брэгга (непрерывная) и нормированной активной мощностью в нагрузке (штриховая)

### 1.7. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

Задание предусматривает знакомство с акустооптическим эффектом, принципом действия и основными расчетными соотношениями при проектировании АО дефлектора; рассмотрение различных аспектов при выборе материалов для СЗП и ПП. Расчетная часть предполагает обоснованный выбор материалов для СЗП и ПП акустооптического дефлектора, расчет основных конструктивных и функциональных параметров дефлектора, геометрии АО взаимодействия. Исходные данные для расчета выбираются в соответствии с таблицей 1.3.

## Варианты задания

Номер варианта	Средняя частота входного сигнала $f_0$ , МГц	Длительность сигнала, мкс	Длина оптической волны $\lambda_0$ , мкм	Относительная интенсивность дифрагированного света $I_1/I_0$ , %
1	50	50	0,633	40
2	60	30		50
3	70	20		60
4	80	15		70
5	90	12		80
6	100	10		40
7	150	8		50
8	200	10		60
9	250	8		70
10	500	6		80
11	750	4		40
12	1000	1,0		50
13	1600	1,5		60
14	2000	2,0		70
15	2500	2,5		80

**1.8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Расчет электроакустооптического тракта АОД включает выбор материалов СЗП и ПП, определение безразмерных параметров упрощенной электрической эквивалентной схемы ПП, расчет геометрии акустооптического взаимодействия, размерных параметров эквивалентной схемы ПП, электрической согласующей цепи ПП и электрооптических характеристик. В рамках одной лабораторной работы все стадии расчета выполнить сложно. Основное внимание поэтому будет уделено нахождению важнейших технических

характеристик АОД, определяемых энергетической эффективностью акустооптического взаимодействия в заданной полосе частот.

### 1.8.1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА СЗП

Материал выбирается в соответствии с рекомендациями раздела 1.4, пользуясь таблицей 1.1 и номограммой на рисунке 1.6. Ширина полосы выбирается максимально возможной, т. е.  $f_0/2$ .

### 1.8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТА

Определив параметры материала, далее рассчитывают:

- угол Брэг  $a$ , используя выражения (1.4); (1.14);
- разрешающую способность  $N$  – выражение (1.16);
- длину СЗП  $D$  (апертуру светового пучка) – выражение (1.17);
- длину ПП  $L$  (апертуру акустического пучка) – выражение (1.12);
- ширину ПП  $B$  (высоту акустического пучка) из условия  $B = \sqrt{\lambda_a D}$ , означающего, что на частоте  $f_0$  весь СЗП располагается в ближней зоне преобразователя;
- параметр Кляйна – Кука  $Q_K$  – выражение (1.5). Необходимо иметь в виду, что найденные параметры  $N$ ,  $D$ ,  $L$  являются максимально возможными и требуют уточнения.

### 1.8.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПП

Безразмерные параметры упрощенной эквивалентной схемы ПП рассчитываются, используя рекомендации разделов 1.4, 1.5. Сначала выбирают материал ПП по таблице 1.2, ориентируясь на рекомендации раздела 1.4, затем по выражениям (1.30 – 1.33) рассчитывают параметры схемы  $K$ ,  $C$ ,  $Q$ ,  $L$ . Ёмкость  $C_0$  находят как ёмкость плоского конденсатора с площадью  $L \cdot H$  и

толщиной, равной  $\frac{\lambda_a}{2} \left( C_0 = \varepsilon \frac{2 \cdot L \cdot H}{\lambda_a} \right)$ .

### 1.8.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТООПТИЧЕСКОГО ТРАКТА

По заданной величине относительной эффективности  $I_1/I_0$  необходимо определить величину, используя выражение (1.8), а затем по выражению (1.7) оценить акустическую мощность  $P_a$ , необходимую для заданной  $I_1/I_0$ .

Определение реальных характеристик АО тракта. Реальные характеристики АО тракта  $N$ ,  $D$ ,  $L$ ,  $Q_K$  и т. д. можно найти, построив семейства характеристик аналогично показанным на рисунке 1.10 по формулам раздела 1.6.

Так как все зависимости частотные, по оси абсцисс откладывается относительная частота  $F$  в пределах от нуля до двух. По оси ординат откладываются значения  $K_{AZ}$ ,  $K_{AO}$ ,  $K_{CЦ}$ , вычисленные по формулам (1.36, 1.35, 1.34). В формуле (1.36) изменение частоты влияет и на параметр  $x_0$ , поэтому строится несколько кривых (не менее трёх). В формуле (1.35) два управляемых параметра -  $Q_K$  и  $r_B$ , поэтому строятся два семейства кривых  $K_{AO}'$  и  $K_A''$ , параметрам  $Q_K$  и  $r_B$  также дается не менее трёх значений. Для большинства практических случаев  $r_B = 0,4 \dots 1,2$ , а  $Q_K = 10 \dots 50$ , одно из значений  $Q_K$  - рассчитанное. В формуле (1.34) для построения используется только сомножитель  $K_{CЦ}(K, Q, F)$ , а т. к. размерные параметры эквивалентной схемы ПП не рассчитывались, строится одна кривая с параметрами, определёнными в пункте 1.8.3.

Далее производится анализ полученных характеристик, для заданного значения эффективности определяется полоса, реально достижимая в данном устройстве (наименьшая из всех возможных), а далее реальные значения  $N$ ,  $D$ ,  $L$ ,  $Q_K$ ,  $H$ . Далее по формуле (1.29) определяется  $P_a$ , затем и  $I_1/I_0$ , которое сравнивается с заданным. В случае значительного расхождения значений  $I_1/I_0$  необходимо дать рекомендации по улучшению значения параметра.

Проверку можно осуществить, построив семейства кривых по формулам (1.17, 1.18, 1.20); определив при этом реальное значение  $N$ , а затем и все остальные параметры. Пример показан на рисунке 1.5.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данные методические указания направлены на изучение физических принципов работы акустооптических рефлекторов и процесса их проектирования. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балакший В. И. Физические основы акустооптики. / В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков - М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.
2. Магдич Л.Н. Акустооптические устройства и их применение. / Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов – М.: Сов. радио, 1978.-112 с.
3. Гусев О.Б. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д.В. Тигин; ред. С.В. Кулаков. – М.: Радио и связь, 1989.- 136 с.
4. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: учебное пособие для вузов. / А. А. Блистанов – М.: «МИСИС», 2000. – 432 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Лабораторная работа №5. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ДЕФЛЕКТОРЫ .....	4
1.1. Цель работы .....	4
1.2. Акустооптический эффект.....	4
1.3. Основные расчетные соотношения .....	6
1.3.1. Модуляторы .....	7
1.3.2. Дефлекторы.....	8
1.4. Материалы для акустического узла.....	12
1.5. Определение безразмерных параметров упрощенной электрической эквивалентной схемы ПП .....	17
1.6. Расчет геометрии акустооптического взаимодействия .....	18
1.7. Лабораторное задание .....	20
1.8. Порядок выполнения работы .....	21
1.8.1. Выбор материала СЗП.....	22
1.8.2. Определение технических и конструктивных параметров тракта.....	22
1.8.3. Определение безразмерных параметров упрощенной электрической эквивалентной схемы ПП.....	22
1.8.4. Определение энергетических характеристик акустооптического тракта .....	22
Заключение.....	23
Библиографический список.....	24

# **Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах**

## ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторной работы № 5  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
очной формы обучения*

Составитель  
Сукачев Александр Игоревич

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.09.2022.

Уч.-изд. л. 1,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84