

Поверхность изолятора в этом случае расположена в квазигодномодном поле, обеспечивая максимальное НПП. При  $n=3$  поверхность изолятора расположена в неоднородном поле, что приводит к снижению НПП.

Таким образом, результаты эксперимента показывают возможность повышения НПП изолятора в 1.2—1.5 раза за счет придания определенной формы его поверхности.

### Список литературы

- [1] Вальтер А. Ф., Инге Л. Д. // ЖТФ. 1932. Т. 11. Вып. 6. С. 582—587.
- [2] Ушаков В. Я., Муратов В. М., Лопатин Б. В. и др. // Электричество. 1980. № 12. С. 56—58.
- [3] Куртеньков Г. Е. // Электронная обработка материалов. 1973. № 6. С. 53—56.
- [4] Губкин А. Н. Физика диэлектриков. М., 1971. 272 с.
- [5] Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л., 1987. 189 с.
- [6] Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М.; Л., 1960. 463 с.

Научно-исследовательский институт  
высоких напряжений  
при Томском политехническом институте  
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию  
26 июля 1989 г.

08; 12

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

## РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НЕКОЛЛИНЕАРНОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

В. М. Епихин, Ф. Л. Визен

Важнейшим параметром акустооптического фильтра (АОФ), работающего в качестве дисперсионного элемента спектрометра, является диапазон спектральной перестройки  $\lambda_1 - \lambda_2$ , обусловленный полосой управляющих частот  $f_1 - f_2$ . Из основных соотношений для АОФ, полученных в [1-3], следует, что при условии нормальной дисперсии материала светозвукопровода АОФ ( $dn/d\lambda < 0$ , где  $n$  — показатель преломления) относительный спектральный диапазон классического АОФ в принципе не может превышать величины относительного частотного диапазона

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} < \frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{\Delta f}{f_1}. \quad (1)$$

Последняя обычно ограничена добротностью системы светозвукопровод—связующий слой—электроакустический пьезопреобразователь (ПП)—ВЧ электрический тракт. Увеличение полосы  $\Delta f$  — серьезная техническая задача, для ее решения необходимо совершенствование технологии изготовления ПП и электрических схем его согласования с ВЧ генератором. Дополнительные трудности возникают при  $\Delta f/f_1 \geq 2$  и связаны с возникновением паразитных полос пропускания спектрометра («духов»), обусловленных кратными гармониками ВЧ генератора. На практике относительная частотная перестройка обычно не превышает октаву, т. е.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} < \frac{\Delta f}{f_1} < 2.$$

Возникает вопрос, можно ли расширить спектральный диапазон АОФ, не увеличивая полосу рабочих частот и оставляя в силе требование большой угловой апертуры [2]. Цель данной работы — показать возможность создания АОФ, в котором относительный спектральный диапазон значительно (приблизительно в два раза) превышает относительный частотный диапазон (при этом неравенство (1) нарушается), рассмотреть основные характеристики такого фильтра и его особенности.

Согласно [3, 4], в одноосном кристалле для каждого значения угла ориентации звукового волнового вектора  $q$  в интервале углов  $0 \leq \gamma < 19^\circ$  существуют два значения  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  угла ориентации световых волновых векторов  $K_1^o$  и  $K_2^o$ , для которых одновременно выполняется

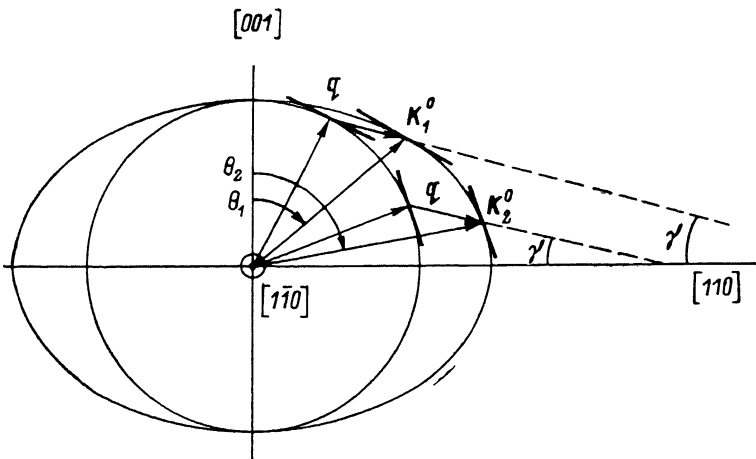


Рис. 1. Векторная диаграмма акустооптического взаимодействия в двухканальном АОФ.

условие большой угловой апертуры. Указанная двужанность функции  $\Theta(\gamma)$  позволяет осуществить конструкцию двухканального АОФ, в котором происходит одновременная оптимальная фильтрация анализируемого излучения на одной ультразвуковой волне (УЗВ) в двух спектральных поддиапазонах (каналах), в результате суммарный спектральный диапазон расширяется.

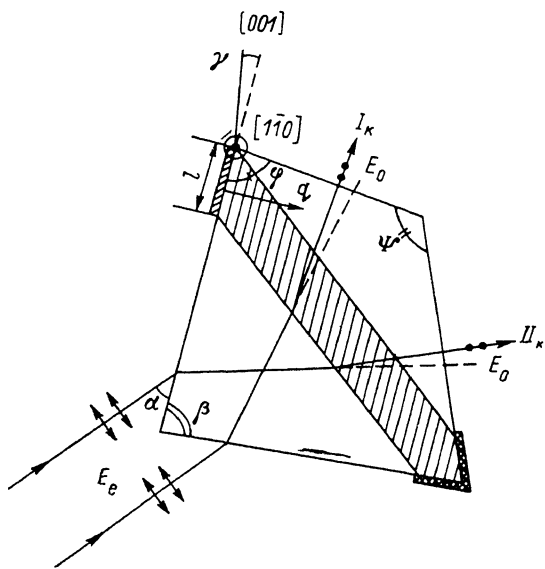


Рис. 2. Эскиз светозвукопровода двухканального АОФ.

Суть предлагаемой конструкции АОФ понятна из рисунков, где показаны векторная диаграмма акустооптического взаимодействия (рис. 1), эскиз светозвукопровода двухканального АОФ (рис. 2) и взаимное расположение поддиапазонов на спектральной оси (рис. 3). Для определенности рассмотрен кристалл парателлуриата ( $TeO_2$ ). Свет на входе в кристалл поляризован в плоскости рисунка для уменьшения потерь на отражение. Входная оптическая ось АОФ вне кристалла совпадает для обоих каналов и расположена в плоскости  $(1\bar{1}0)$  под углом  $\alpha$  к плоскости ПП. Входная оптическая грань первого канала расположена параллельно оси  $[1\bar{1}0]$  под углом  $\beta$  к плоскости ПП. Входная оптическая грань второго канала совпадает с плоскостью ПП.

Для расчета параметров  $\gamma$ ,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  двухканального оптимального АОФ на  $TeO_2$  при заданной полосе управляющих частот  $f_1 - f_2$  и перекрытии спектральных каналов  $\Delta\lambda$  необходимо решить систему уравнений [4]

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\cos [\operatorname{arctg} (\eta^2 \operatorname{tg} \Theta)] - A(\Theta) \cos \Theta}{A(\Theta) \sin \Theta - \sin [\operatorname{arctg} (\eta^2 \operatorname{tg} \Theta)]}, \quad (2)$$

$$\Phi(\gamma, \Theta_1, f_1) - \Phi(\gamma, \Theta_2, f_2) = \Delta\lambda, \quad (3)$$

где  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  — корни уравнения (2),  $\Theta_1 = \min\{\Theta_1, \Theta_2\}$ ,  $f_1 = \min\{f_1, f_2\}$ ,  $\lambda_1 = \min\{\lambda_1, \lambda_2\}$ ,

$$\Phi(\gamma, \theta, f) = \frac{V \cdot n_0 \cdot A(\theta)}{f} \sin(\theta - \gamma) \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{(1 - \eta^2) \sin^2 \theta}{\sin^2(\theta - \gamma)} \right]^{1/2} \right\},$$

$$A(\theta) = (\eta^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)^{-1/2}; \quad \eta = \frac{n_0}{n_e},$$

$$v = \left\{ \frac{[(c_{11} - c_{12})/2] \cos^2 \gamma + c_{44} \sin^2 \gamma}{\rho} \right\}^{1/2},$$

где  $v$  — скорость УЗВ,  $c_{ij}$  — упругие константы,  $\rho$  — плотность материала световозводпровода.

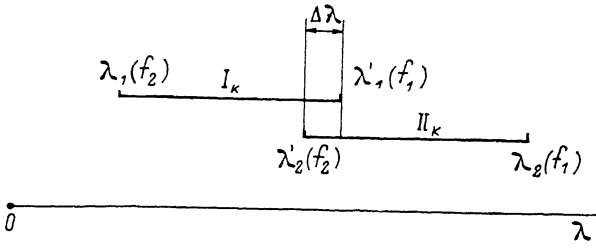


Рис. 3. Расположение поддиапазонов двухканального АОФ на спектральной оси.

Для учета дисперсии использовались аналитические зависимости показателей преломления  $n_o(\lambda)$  и  $n_e(\lambda)$ , полученные в [5]. Угол ориентации входной оптической оси  $\alpha$  и углы призмы световозводпровода  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  определяются следующими выражениями:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin [n_o A(\theta_2) \cos(\theta_2 - \gamma)],$$

$$\beta = 90^\circ + \theta_1 - \gamma - \arctg \left[ \frac{\sin(\alpha - \theta_1 + \gamma)}{n_o A(\theta_1) - \cos(\alpha - \theta_1 + \gamma)} \right],$$

$$\varphi = 90^\circ + \gamma - \arctg(\eta^2 \operatorname{tg} \theta_1),$$

$$\psi = 180^\circ + \theta_1 - \arctg(\eta^2 \operatorname{tg} \theta_2),$$

(4)

причем при вычислении  $\theta_2$ ,  $\alpha$  и  $\psi$  по формулам (2), (4) в  $\eta = n_o/n_e$  использовалось значение  $\lambda = \lambda_2^* = (\lambda_2' + \lambda_2)/2$ , а при вычислении  $\theta_1$ ,  $\varphi$  по формулам (2), (4) в  $\eta = n_o/n_e$  использовалось значение  $\lambda = \lambda_1^* = (\lambda_1' + \lambda_1)/2$ . Углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  подобраны таким образом, что излучение с длинами волн, соответствующими серединам спектральных поддиапазонов, распространяется внутри кристалла точно под оптимальными углами к оптической оси  $\theta_1(\gamma)$  и  $\theta_2(\gamma)$ , а волновые векторы продифрагировавшего излучения ортогональны выходным граням АОФ.

Приведенные выше формулы полностью определяют геометрию двухканального АОФ. Границы спектральных поддиапазонов определяются по формулам

$$\lambda_1 = \Phi(\gamma, \theta_1, f_2), \quad \lambda_1' = \Phi(\gamma, \theta_1, f_1),$$

$$\lambda_2 = \Phi(\gamma, \theta_2, f_2), \quad \lambda_2' = \Phi(\gamma, \theta_2, f_1).$$

Если заданными параметрами являются спектральный диапазон  $\lambda_1 - \lambda_2$  и перекрытие спектральных каналов  $\Delta\lambda$ , то расчет геометрии АОФ  $(\gamma, \theta_1, \theta_2)$  сводится к решению системы уравнений

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\cos[\arctg(\eta^2 \operatorname{tg} \theta)] - A(\theta) \cos \theta}{A(\theta) \sin \theta - \sin[\arctg(\eta^2 \operatorname{tg} \theta)]},$$

$$f_1 = F(\gamma, \theta_2, \lambda_2), \quad f_2 = F(\gamma, \theta_1, \lambda_1),$$

$$\Phi(\gamma, \theta_1, f_1) - \Phi(\gamma, \theta_2, f_2) = \Delta\lambda,$$

где

$$F(\gamma, \theta, \lambda) = \frac{V n_o A(\theta)}{\lambda} \sin(\theta - \gamma) \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{(1 - \eta^2) \sin^2 \theta}{\sin^2(\theta - \gamma)} \right]^{1/2} \right\},$$

остальные обозначения прежние, формулы для  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  совпадают с (4).

Мерой, селективирующей способности АОФ, может служить оценка ширины аппаратной функции по уровню  $0.5 \Delta\lambda_{0.5}$  [6]

$$\Delta\lambda_{0.5} \approx \frac{0.9\lambda}{L \sin^2 \theta_2 b},$$

где  $\lambda$  — длина волны пропускаемая;  $L$  — длина взаимодействия свет—звук, т. е. расстояние, на котором световой пучок пересекает звуковой столб;

$$b = \Delta n \left( 1 - \frac{\lambda}{\Delta n} \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda} \right)$$

— дисперсионная константа.

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного решения на ЭВМ системы уравнений (2), (3) и спектральные характеристики для четырех вариантов двухканального АОФ сведены в таблицу. Длина ПП для всех вариантов АОФ принималась одинаковой  $l=1$  см. Смысл обозначений  $f_1, f_2, \Theta_1, \Theta_2$ ,

Параметры различных вариантов двухканального АОФ на  $\text{TeO}_2$

$N$	1	2	3	4
$f_1$ , МГц	40	60	120	140
$f_2$ , МГц	60	90	180	210
$\Theta_1$ , град	23.0	22.8	23.6	26.2
$\Theta_2$ , град	80.0	80.1	79.8	78.6
$\gamma$ , град	9.91	9.80	10.10	11.08
$\lambda_1$ , мкм	1.138	0.766	0.435	0.422
$\lambda'_1$ , мкм	1.708	1.149	0.652	0.633
$\lambda'_2$ , мкм	1.697	1.139	0.602	0.542
$\lambda_2$ , мкм	2.546	1.708	0.903	0.814
$\Delta\lambda_1$ , Å	62.4	25.8	4.6	3.7
$\Delta\lambda'_1$ , Å	147.5	64.6	16.3	12.8
$\Delta\lambda'_2$ , Å	30.7	13.1	2.9	2.3
$\Delta\lambda_2$ , Å	70.6	30.9	7.9	6.5
$P$ , Вт	4.6	2.0	0.45	0.40
$T_1$ , отн. ед.	0.27	0.21	0.21	0.29
$T'_1$ , отн. ед.	0.98	0.98	1.0	1.0
$T'_2$ , отн. ед.	0.51	0.50	0.50	0.6
$T_2$ , отн. ед.	0.25	0.24	0.22	0.26

$\gamma, \lambda_1, \lambda'_1, \lambda_2, \lambda'_2$  ясен из рис. 1—3;  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda'_1, \Delta\lambda'_2, \Delta\lambda_2$  — ширины ашпаратной функции на концах спектральных поддиапазонов.

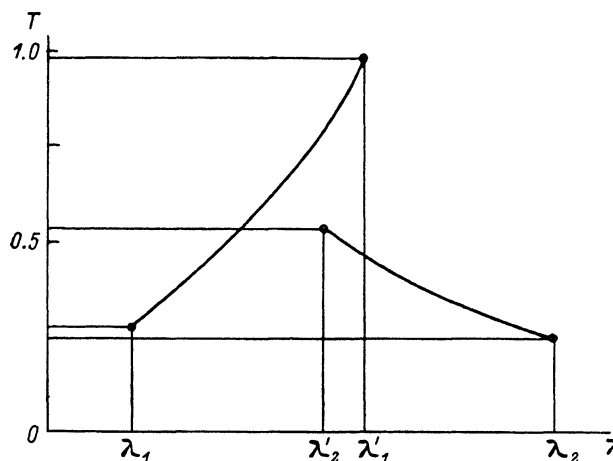


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности двухканального АОФ от длины волны излучения для варианта  $N=1$ .

Как видно из таблицы, перестройка управляющей частоты всего в 1.5 раза обеспечивает перестройку полного спектрального диапазона АОФ не менее чем на октаву.

Представляет практический интерес спектральная зависимость эффективности фильтра в каждом из каналов при различных значениях мощности УЗВ, распространяющейся в кри-

сгалье. Согласно [6], эффективность неколлинеарного АОФ при нулевой расстройке дается выражением

$$T = \sin^2 \left( \frac{\pi^2}{2} \frac{M_2}{\lambda^2} P \frac{L}{H} \right)^{1/2},$$

где  $M_2 = n_0^6 A^3(\Theta) p^2 / \rho V$  — коэффициент акустооптического качества,  $p$  — эффективная фотоупругая константа [7];  $P$  — мощность УЗВ,  $\lambda$  — длина волны света в вакууме,  $H$  — поперечный размер ПП.

Анализ показывает, что неравномерность эффективности АОФ в полном спектральном диапазоне минимальна при выполнении условия

$$P_{1\max}(\lambda'_1) \leq P < P_{2\max}(\lambda'_2), \quad (5)$$

где  $P_{1\max}$ ,  $P_{2\max}$  — значения мощности УЗВ, определяемые соотношениями

$$T_1(\lambda'_1, P_{1\max}) = 1, \quad T_2(\lambda'_2, P_{2\max}) = 1,$$

т. е. в «запредельном» режиме для первого канала, когда мощность УЗВ превышает необходимую для максимальной (единичной) эффективности в каждой точке первого спектрального поддиапазона. В таблицу включены результаты расчета эффективности АОФ на границах поддиапазонов  $T_1$ ,  $T'_1$ ,  $T'_2$ ,  $T_2$  для некоторых значений  $P$ , удовлетворяющих условию (5) при  $H=1$  см. На рис. 4 в качестве примера приведена спектральная зависимость эффективности в каждом из спектральных каналов, соответствующая варианту  $N=1$  таблицы.

### Выводы

1. Предлагаемый способ позволяет расширить спектральный диапазон АОФ при заданной полосе управляющих частот. Эта цель достигается увеличением степени интеграции оптических граней в АОФ, т. е. объединением в одном световодопроводе с одним звуковым пучком двух широкоугольных АОФ с перекрывающимися спектральными поддиапазонами.

2. Этот способ позволяет решить обратную задачу — сузить полосу частот УЗВ при заданном спектральном диапазоне. В этом случае время перестройки фильтра по диапазону также уменьшается пропорционально степени сужения частотной полосы.

3. Спектральное перекрытие  $\Delta\lambda$  может иметь любой знак. При  $\Delta\lambda < 0$  фильтр селективирует излучение в двух разнесенных по спектру поддиапазонах, положение которых определяется конкретными условиями технической задачи. При этом алгоритмы расчета параметров АОФ не изменяются.

В заключение благодарим Е. Я. Рашба за помощь при проведении расчетов на ЭВМ.

### Список литературы

- [1] Harris S. E., Wallance R. W. // J. Opt. Soc. Am. 1969. Vol. 59. N 6. P. 744—747.
- [2] Chang I. C. // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. N 7. P. 370—372.
- [3] Епихин В. М., Визен Ф. Л., Никитин Н. В., Калинин Ю. К. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 12. С. 2405—2410.
- [4] Епихин В. М., Визен Ф. Л., Пальцев Л. Л. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1910—1917.
- [5] Uchida N. // Phys. Rev. B. 1971. Vol. 4. N 10. P. 3736—3774.
- [6] Chang I. C. // Opt. Eng. 1981. Vol. 20. N 6. P. 824—829.
- [7] Coquin G. A., Pinnow D. A., Warner A. W. // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 6. P. 2162—2168.

Поступило в Редакцию  
1 августа 1989 г.