

07;08;09

## Метод создания широкополосных акустооптических гиперзвуковых брэгговских ячеек

© В.В. Петров

Саратовский государственный университет,  
410071 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 13 мая 1996 г.)

Обсуждается метод создания широкополосных акустооптических гиперзвуковых ячеек, основанный на использовании многоэлементных электроакустических преобразователей, представляющих собой структуры с частотно зависимым в общем случае сдвигом фазы на ячейку, а также с изменяющимся шагом между элементами. Показано, что описываемый метод позволяет создавать высокоэффективные брэгговские ячейки с полосой частот 3 GHz и более.

### Введение

Акустооптические (АО) брэгговские устройства нашли широкое применение в современных системах оптической обработки информации. Информационная емкость таких систем зависит в основном от абсолютной полосы частот АО брэгговской ячейки. Полоса частот АО ячейки, обеспечивающей высокое частотное разрешение (дефлектора) при использовании одноэлементного преобразователя, определяется расходимостью звукового пучка, а апертура светового пучка в этом случае выбирается, как правило, достаточно большой, так что его расходимость оказывает незначительное влияние на полосу частот.

При расширении полосы путем увеличения расходимости звукового пучка приходится уменьшать протяженность АО взаимодействия, что ведет к уменьшению дифракционной эффективности. Известны способы расширения полосы частот дефлекторов путем реализации дифракции света в условиях АО резонанса [1], при котором резко возрастает коэффициент уругооптического качества, что может быть использовано для увеличения полосы простым сокращением длины области взаимодействия, путем анизотропной брэгговской дифракции [2,3], когда требуемый угол падения света на АО ячейку слабо меняется в некоторой полосе частот, а также путем применения решеток преобразователей с заданным сдвигом фазы на период [4–6], реализующих автоподстройку звукового пучка под угол Брэгга. Однако эти методы не обеспечивают точного выполнения условия Брэгга в заданной полосе частот, что ведет к необходимости ограничивать длину преобразователя и соответственно дифракционную эффективность. В работе [7] показано, что энергетический выигрыш от использования многоэлементных преобразователей увеличивается с увеличением центральной частоты рабочего диапазона. Так, выигрыш в эффективности дифракции при использовании "однолепесткового" многоэлементного преобразователя по сравнению с одноэлементным на частоте 10 GHz может достигать 30 раз при одинаковой полосе рабочих частот, однако такой выигрыш реализуется лишь для

оптимального значения полосы, соответствующего 10% или 1 GHz. При необходимости реализации широкой полосы частоты (50% и более) выигрыш от использования описанных периодических многоэлементных преобразователей не превышает 2 в сравнении с одноэлементным.

В настоящей работе предлагается и анализируется возможность дополнительного существенного расширения полосы частот брэгговских акустооптических устройств за счет создания такой системы многоэлементных преобразователей, которая обеспечивает точную автоподстройку фронта звуковой волны под угол Брэгга в требуемой полосе частот. При этом снимается ограничение на длину преобразователя, связанное с несоответствием частотного закона сканирования звукового пучка и брэгговского условия; эти ограничения теперь могут лишь касаться проблем электрического согласования, геометрии рассеяния и др.

### Анализируемая модель многоэлементного преобразователя

Не нарушая строгости рассуждений, касающихся основных принципов предлагаемого метода, для изотропного акустооптического взаимодействия ограничимся рассмотрением случая изотропной акустооптической среды. Будем обсуждать случай АО дефлектора, т.е. когда падающий пучок света имеет широкую апертуру и полоса частот акустооптического взаимодействия определяется в большей степени расходимостью или автоподстройкой звукового пучка. Рассмотрим в начале периодическую систему пьезоизлучателей. Предположим, что многоэлементная структура пьезоэлементов имеет длину  $L$  (вдоль оси  $x$  прямоугольной системы координат) и период  $l$ , так что число элементов равно  $L/l = n$  (рис. 1). Будем считать, что протяженность одного излучателя ( $a$ ) вдоль АО взаимодействия много меньше его длины, тогда справедливо рассмотрение двумерной модели в плоскости  $xz$  ( $y = 0$ ).

В общем случае такая структура может быть представлена как некоторая волноведущая система. Следуя

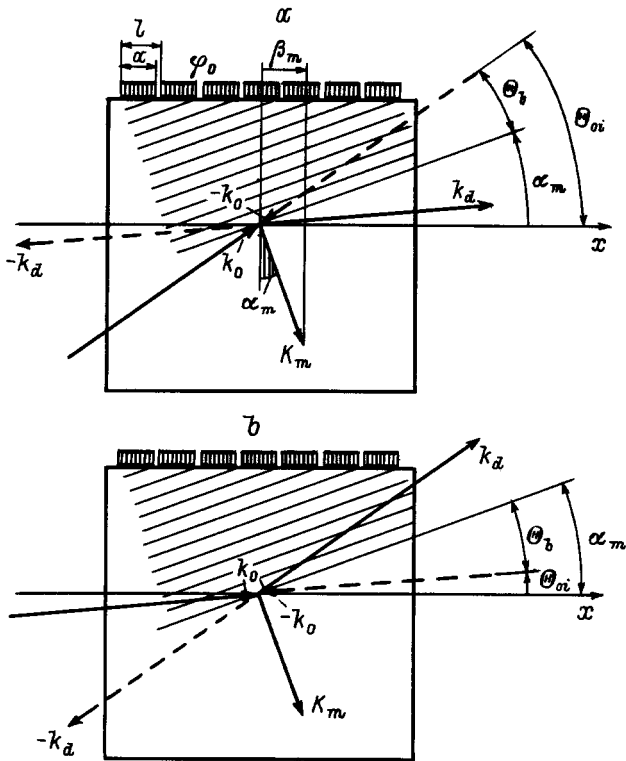


Рис. 1. Геометрия акустооптического взаимодействия для различных направлений падения светового пучка с волновым вектором  $\mathbf{k}_0$  ( $-\mathbf{k}_0$ ).

подходу, предложенному в работе [5], и принимая во внимание теорему Флоке [8], мы будем рассматривать электрическое поле в многоэлементной системе как бесконечную сумму пространственных гармоник, каждая ( $m$ -я) из которых имеет волновое число  $\beta_m$ . Если сдвиг фазы между соседними элементами  $\varphi_0(f)$ , то сдвиг фазы на период для  $m$ -й пространственной гармоники  $\varphi_m(f) = \varphi_0(f) + 2\pi m$  или  $\varphi_m = \beta_m l$ . Каждая  $m$ -я гармоника электрического поля возбуждает плоскую акустическую волну, движущуюся со скоростью звука  $V$  в направлении волнового вектора  $\mathbf{K}_m$ , модуль которого равен  $K = 2\pi/\Lambda = 2\pi f/V$ , где  $\Lambda$  — длина звуковой волны. Волновое число  $\beta_m$  есть модуль проекции волнового вектора  $\mathbf{K}$  на плоскость преобразователя  $\beta_m = \varphi_m(f)/l$ . Тогда закон изменения с частотой угла  $\alpha_m$  наклона фронта  $m$ -й гармоники акустического поля запишется как  $\alpha_m = \arcsin[\varphi_m(f)V/2\pi fl]$ . Брэгговское условие имеет вид  $\Theta_b = \arcsin(\lambda_0 f/2n_0 V)$ , где  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме,  $n_0$  — показатель преломления. Если предположить, что многоэлементная структура обеспечивает точную коррекцию акустического волнового фронта в требуемой полосе частот, тогда для четырех вариантов геометрии акустооптического взаимодействия, показанных на рис. 1 ( $a$  —  $i = 1$ ,  $b$  —  $i = 2$  (при падении света с волновым вектором  $\mathbf{k}_0$  или  $-\mathbf{k}_0$ )), справедливо соотношение, характеризующее неизменность угла падения  $\Theta_{0i} = \alpha_m(f) - (-1)^i \Theta_b$ , где  $\Theta_{0i}$  — угол

падения света, отсчитываемый против часовой стрелки от положительного направления координатной оси  $x$ , вдоль которой расположена многоэлементная структура, а индекс  $i$  характеризует направление падающего света.<sup>1</sup> С учетом вышеприведенных выражений для  $\alpha_m(f)$  и  $\Theta_b(f)$  можно переписать

$$\Theta_{0i} = \arcsin\{[V/2\pi][\varphi_m(f)/lf]\} - (-1)^i \arcsin[(\lambda_0/2n_0 V)f], \quad (1)$$

где  $V/2\pi$  и  $n_0$  — константы,  $f$  — переменная,  $\lambda_0$  — фиксированное значение длины волны света.

Очевидно, что точная автоподстройка в заданной полосе частот (изменение угла  $\alpha_m$  в точном соответствии с изменением брэгговского угла  $\Theta_b$ ) возможна лишь при изменении с частотой либо сдвига фазы на период для выбранной пространственной гармоники  $\varphi_m(f)$ , либо периода системы  $l$ . В последнем случае система перестает быть периодической.

### Условия точной автоподстройки под угол Брэгга

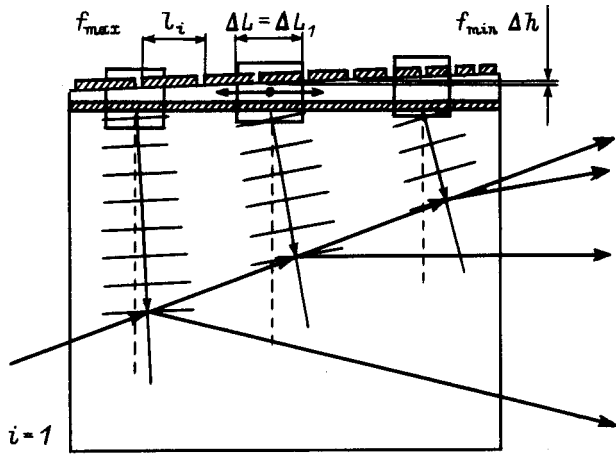
Возможность точной автоподстройки посредством обеспечения идеальной (требуемой) зависимости сдвига фазы на период в многоэлементном преобразователе обсуждалась ранее в работах [5,9,10]. Формула для определения идеальной зависимости  $\varphi_{mid}(f)$  может быть получена из соотношения (1) и имеет вид

$$\varphi_{mid}(f) = (2\pi fl/V) \times \sin[\Theta_{0i} + (-1)^i \arcsin(\lambda_0 f/2n_0 V)]. \quad (2)$$

Рассмотрим другой вариант обеспечения точной автоподстройки в заданной полосе частот. Предположим, что длина  $L$  многоэлементной структуры сколь угодно велика. Будем также считать, что шаг системы  $l$ , незначительно изменяется в пределах некоторого участка длины  $\Delta L$ , так что его можно считать практически постоянным. В этом случае рассуждения о разложении электрического поля в преобразователе и возбуждаемого им акустического поля в кристалле по пространственным гармоникам остаются справедливыми, верна также формула (1). Получим теперь из выражения (1) соотношение для нахождения периода преобразователя, который для каждой частоты заданной рабочей полосы будет обеспечивать наклон фронта акустической волны в точном соответствии с условием Брэгга

$$l = \varphi_m V / 2\pi f \sin\{\Theta_{0i} + (-1)^i \arcsin(\lambda_0 f/2n_0 V)\}. \quad (3)$$

<sup>1</sup> Следует отметить, что если индекс  $i$  равен 1 для многоэлементной системы с "нормальной" дисперсией или для систем с не зависящим от частоты сдвигом фазы на период, то обеспечивается режим "автоподстройки", в этом случае при  $i = 2$  происходит "авторасстройка" условия Брэгга при малейшем изменении частоты, т.е. АО ячейка начинает работать как АО фильтр. Для систем с "аномальной" дисперсией ситуация меняется на противоположную, т.е.  $i = 2$  соответствует автоподстройке, а  $i = 1$  — авторасстройке.



**Рис. 2.** Точная автоподстройка под угол Брэгга с помощью многоэлементного преобразователя с переменными параметрами.

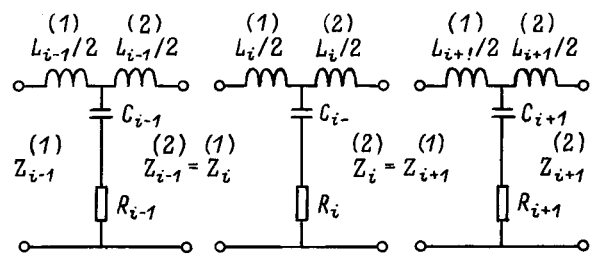
Угол падения  $\Theta_{0i}$  здесь равен углу Брэгга для некоторой фиксированной частоты  $f_c$ :  $\Theta_{0i} = \arcsin(\lambda_0 f_c / 2n_0 V)$ . Таким образом, если построить многоэлементную структуру, которая имеет изменяющиеся вдоль длины  $L$  расстояния между центрами соседних элементов ( $l$ ) по закону (3), то для любого малого участка  $\delta f$  рабочего диапазона найдется область преобразователя  $\Delta L$ , на которой шаг системы изменяется на  $\delta l$  и которая будет излучать акустическую энергию в направлении, соответствующем условию Брэгга. Эта область ( $\Delta L$ ) напоминает окно, перемещающееся от начала преобразователя к его концу при изменении частоты от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ . Очевидно, что только та доля акустического пучка, которая излучается областью  $\Delta L$ , будет участвовать в акустооптическом взаимодействии. При этом, если пьезослой электроакустического преобразователя имеет одинаковую толщину по всей длине и рассчитан таким образом, что обеспечивает столь же широкую полосу, что и требуемая полоса АО взаимодействия, то часть излучаемой акустической энергии, не участвующая во АО взаимодействии, будет теряться подобно тому, как это происходит в АО ячейках с одноэлементным преобразователем, возбуждающем сильно расходящийся акустический пучок, что, безусловно, повлияет на эффективность АО взаимодействия. По этой причине для обсуждаемой системы с переменным шагом наиболее логичным является использование пьезопреобразователя, имеющего плавно или ступенчато изменяющуюся по длине толщину пьезослоя. Такой пьезопреобразователь должен быть рассчитан так, чтобы для каждого малого участка частотного диапазона  $\delta f$  возбуждение акустической энергии происходило в окне длиной  $\Delta L_1 = \Delta L$ . Причем закон изменения толщины пьезослоя  $h(f)$  должен обеспечивать согласованное движение вдоль системы окна  $\Delta L$ , открывающего часть решетки, и окна  $\Delta L_1$ , на котором толщина пьезослоя изменяется на  $\Delta h$ . При таком подходе выбор полной длины преобразователя  $L$

определяется уже не требуемой шириной полосы частот  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ , а оптимальным выбором параметров  $\delta f$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta L_1$ ,  $\Delta h$  и  $\delta l$ . Дифракционная эффективность в этом случае будет определяться длиной участка  $\Delta L$ .

На рис. 2 показана геометрия акустооптического взаимодействия для случая ( $i = 1$ ), когда точная автоподстройка под угол Брэгга в требуемой полосе частот обеспечивается многоэлементным преобразователем с переменными шагом многоэлементной структуры и толщиной пьезослоя. Эту систему автоподстройки можно называть моделью движущегося окна.

## Вопросы электрического согласования

Проблема создания широкополосных брэгговских акустооптических ячеек может быть условно разделена на три задачи: 1) выполнение брэгговского условия в заданной полосе частот, 2) генерация активных колебаний в требуемой полосе, 3) обеспечение в этой полосе электрического согласования преобразователя с волноведущим трактом. Для случая многоэлементных преобразователей с переменными параметрами эти задачи взаимно дополняют друг друга и должны решаться совместно. Основной особенностью обсуждаемых здесь многоэлементных структур с точки зрения электрического согласования является различие геометрических размеров единичных излучателей. Рассматривая многоэлементный преобразователь как волноведущую структуру, имеющую некоторый сдвиг фазы на элемент, его эквивалентную схему можно представить как многозвенную цепь, каждое звено которой в общем случае содержит активные и реактивные элементы, имеющие изменяющиеся от звена к звену значения. В таком представлении основная проблема электрического согласования сводится к обеспечению согласования соседних звеньев и такого режима, при котором для электрического сигнала, движущегося вдоль преобразователя, частотная полоса каждого последующего звена включала бы частотную полосу предыдущего звена. Например, на рис. 3 приведен вариант многоэлементного преобразователя фильтрового типа ( $T$  — звенья фильтра низких частот). Здесь от звена к звену изменяются параметры преобразователя: его сопротивление излучения  $R$ , емкость  $C$  и индуктивность  $L$ . Эти параметры рассчитываются таким образом,



**Рис. 3.** Эквивалентная схема многоэлементного преобразователя с переменными параметрами.

чтобы выходное характеристическое сопротивление  $Z^2$  каждого последующего звена было бы равно входному характеристическому сопротивлению  $Z^1$  последующего. При этом для рассматриваемого примера — преобразователя типа фильтр низких частот входной электрический сигнал должен подаваться на звено, имеющее самую высокую граничную частоту  $\omega_c = 2/(LC)^{1/2}$ .

## Пример расчета многоэлементной структуры с переменными параметрами

Рассмотрим конкретный пример акустооптической ячейки, в которой реализуется точная автоподстройка под угол Брэгга в полосе 3 GHz (от 1 до 4 GHz) посредством использования многоэлементного преобразователя с плавно меняющимися параметрами и постоянным (равным  $\pi$ ) сдвигом фазы между соседними элементами. На рис. 4 приведены зависимости шага  $l$  многоэлементного преобразователя от частоты  $f$ , построенные по формуле (3), для двух вариантов ( $i = 1$  и  $2$ ) падения светового пучка ( $\lambda_0 = 0.63 \mu\text{m}$ ) по отношению к фронту звуковой волны, возбуждаемой в кристалле ниобата лития (скорость продольной звуковой волны  $V = 6.57 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ , показатель преломления  $n_0 = 2.2$ ). Зависимости получены для трех значений угла падения: 1 —  $\Theta_0 = 0$  (при  $i = 2$ ); 2 —  $\Theta_0 = \Theta_b$  ( $f = 4.1 \text{ GHz}$ ,  $i = 1$ ); 3 —  $\Theta_0 = \Theta_b$  ( $f = 5.1 \text{ GHz}$ ,  $i = 1$ ); 4 —  $\Theta_0 = \Theta_b$  ( $f = 4.1 \text{ GHz}$ ,  $i = 2$ ).

Проанализируем полученные кривые. Из графика следует, что максимальные значения шага структуры могут быть получены, когда для  $i = 1$ , угол падения незначительно превышает угол Брэгга на максимальной частоте рабочего диапазона ( $\Theta_0 = \Theta_b$  ( $f = 4.1 \text{ GHz}$ )). При меньших углах падения, как следует из формулы (3), шаг структуры может принимать нулевое и отрицательные значения. При увеличении угла падения шаг структуры тоже начинает уменьшаться: например, для  $\Theta_0 = \Theta_b$  ( $f = 5.1 \text{ GHz}$ ) шаг уменьшается от полутора раз на

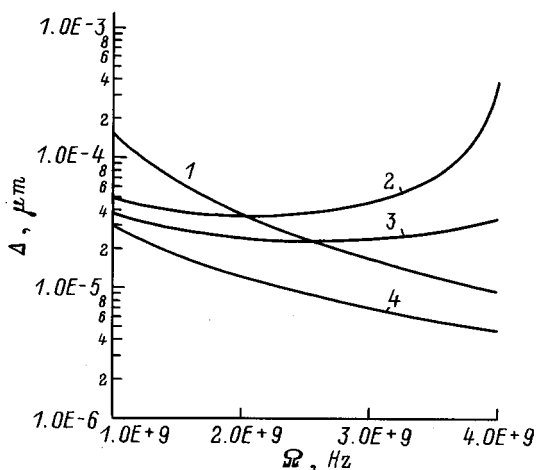


Рис. 4. Шаг ( $\Delta$ ) многоэлементного противофазного преобразователя как функция частоты.

низкочастотном краю до десяти раз на высокочастотном краю диапазона, однако при этом кривая приобретает симметричный характер и перепад значений шага структуры оказывается не столь значительным (не более двух раз) во всем рабочем диапазоне частот, что говорит о возможности получения более высокой дифракционной эффективности. Для случая  $i = 2$  шаг структуры принимает максимальные значения, когда угол падения равен 0. При увеличении угла падения (например, до значения, соответствующего углу Брэгга на частоте 4.1 GHz) шаг структуры уменьшается от нескольких десятков раз, на низкочастотном краю рабочего диапазона до двух раз на высокочастотном краю диапазона при незначительном уменьшении перепада значений на краях диапазона. Следует обратить внимание на существенную особенность геометрии при  $i = 2$  и когда проекции волновых векторов падающего света и звука имеют встречное направление (на рис. 1,  $b$  волновой вектор падающей световой волны  $-\mathbf{k}_0$ ). В этом случае (при  $\Theta_0 = 0$ ) пучок света падает параллельно плоскости многоэлементной структуры и, следовательно, область АО взаимодействия может быть расположена в непосредственной близости от преобразователя. Это особенно важно при создании АО ячеек, работающих в GHz диапазоне радиоволн, где затухание акустических колебаний оказывает существенное значение на дифракционную эффективность и разрешающую способность устройства, а углы Брэгга становятся заметными. Например, для АО ячейки на ниобате лития, рассчитанной на работу в полосе частот 1–4 GHz, угол падения света с длиной волны  $0.83 \mu\text{m}$  в кристалле (равный углу Брэгга в кристалле для частоты 5.1 GHz) равен  $\Theta_b = 9.36^\circ$ . Затухание продольной акустической волны в  $x$ -срезе ниобата лития составляет  $1 \text{ dB/cm} \cdot \text{GHz}^2$  [11]. Если многоэлементный преобразователь имеет полную длину 12 mm, то для случая  $i = 1$  световой пучок должен падать на кристалл на расстоянии по крайней мере 1.8 mm от плоскости преобразователя. На таком расстоянии на высокочастотном краю рабочего диапазона (4 GHz) акустическая волна затухнет на 3 dB, что соответственно приведет к уменьшению вдвое дифракционной эффективности. Геометрия АО рассеяния, соответствующая случаю  $i = 2$ , позволяет исключить указанные потери в дифракционной эффективности.

## Заключение

Предложенный в работе метод точной автоподстройки звукового пучка под угол Брэгга посредством использования многоэлементных преобразователей с изменяющимися параметрами позволяет значительно расширить полосу частот акустооптического взаимодействия при возможности увеличения дифракционной эффективности. В настоящей работе рассмотрены лишь основные принципы предложенного метода.

Для полноты картины необходимо решить задачу о частотных характеристиках электроакустического эле-

мента, имеющего переменную толщину; дальнейшего анализа требует также вопрос о расчете электродинамических параметров многоэлементных структур, имеющих переменный шаг и реальную зависимость от частоты фазового сдвига между соседними элементами. Тем не менее проведенный анализ показывает перспективность обсуждаемого метода для создания широкополосных и эффективных высокочастотных акустооптических брэгговских ячеек.

## Список литературы

- [1] *Petrov V., Gur'ev B., Kolosov V.* et al. // *Photonics and Optoelectronics*. 1994. Vol. 2. N 3. P. 97–103.
- [2] *Dixon R.W.* // *IEEE J.* 1967. Vol. QE-3. N 2. P. 85–93.
- [3] *Леманов В.В., Шакин О.В.* // *ФТТ*. 1972. Т. 14. Вып. 1. С. 229.
- [4] *Korpel A., Adler R., Desmares P., Watson W.* // *Proc. IEEE*. 1966. Vol. 54. N 10. P. 1429–1437.
- [5] *Григорьев М.А., Зюрюкин Ю.А., Петров В.В., Толстиков А.В.* // *Изв. вузов*, 1982. Т. 25. № 8. С. 948–957.
- [6] *Petrov V.* // *Ultrasonics International'93 Conf. Proc. Vienna*, 1993.
- [7] *Петров В.В.* // *Некоторые вопросы прикладной физики*. Изд-во Саратовского университета, 1985. С. 1–9.
- [8] *Силин Р.А., Сазонов В.П.* *Замедляющие системы*. М.: Сов. радио, 1966.
- [9] *Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В.* // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 28. № 7. С. 908–921.
- [10] *Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В.* // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 28. № 8. С. 1053–1064.
- [11] *Баженов С.А., Григорьев М.А., Петров В.В.* // *Акуст. журн*. 1987. Т. 33. Вып. 4. С. 766–767.