

Д. М. ВИННИК, к. т. н. Т. И. ВОРОНЯК

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат",
Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко
E-mail: voroniak@ipm.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
16.02—14.05 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЧ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В УСТРОЙСТВАХ НА КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Изучено распространение и угол сноса ультразвуковых сдвиговых объемных волн СВЧ-диапазона, возбуждаемых с поверхности XY кристалла LiNbO₃ Z-среза встречно-штыревым преобразователем.

Кристаллы ниобата лития (LiNbO₃) используются для разработки акустооптических модуляторов (АОМ) и ультразвуковых линий задержки (УЛЗ) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона на объемных звуковых волнах благодаря низкому уровню затухания звуковых колебаний и высокому значению коэффициента электромеханической связи [1, с. 452—478]. Возможность возбуждения объемной звуковой волны с поверхности этих кристаллов при помощи встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [2, 3] значительно удешевляет и упрощает технологию изготовления АОМ и УЛЗ СВЧ-диапазона. Важным вопросом при конструировании такого рода устройств является выбор типа звуковой волны. Следует учитывать тот факт, что при разработке конструкции УЛЗ СВЧ-диапазона наименьшие линейные размеры звукопровода и наименьшие дифракционные потери достигаются при использовании сдвиговых акустических волн.

При распространении объемных сдвиговых волн в анизотропных средах, какими являются и кристаллы LiNbO₃, следует учитывать явление «сноса» звуковой волны. Указанное явление вызывает отклонение звукового луча от нормали к фронту распространения звуковой волны, т. е. отклонение между направлением распространения звуковой волны и направлением переноса этой волной звуковой энергии. Отсутствие точных сведений об угле «сноса» может привести к ошибке при выборе места позиционирования приемных ВШП в УЛЗ, а следовательно, и к значительным потерям в ней [4].

В работе исследовалось возбуждение ВШП объемных сдвиговых волн с поверхности XY кристалла LiNbO₃ Z-среза на частотах 0,950 ГГц и более и их распространение в кристалле. Определение угла переноса энергии проводилось расчетным и экспериментальными методами. Это связано с тем, что параметры кристаллов LiNbO₃ чувствительны к дефектам различного рода, возникающим в процессе роста этих кристаллов, и поэтому значения тех же параметров,

приведенных в различных работах, не совпадают [1; 5, с. 262; 6].

В дальнейшем будем считать ВШП, возбуждающие объемные звуковые волны с поверхности LiNbO₃ с нерезонансным характером их возбуждения, звуковой антенной, которая состоит из N идентичных, равноамплитудных и одинаково ориентированных в пространстве точечных ультразвуковых источников, размещенных эквидистантно вдоль оси Z антенны (рис. 1). $N+1$ — количество электродов во ВШП. Расстояние между излучателями равно периоду ВШП d . Фаза звукового поля в n -м элементе звуковой антенной решетки определяется функцией $(-1)^n$, которая учитывает то, что на каждом промежутке d между электродами происходит изменение знака электрического поля.

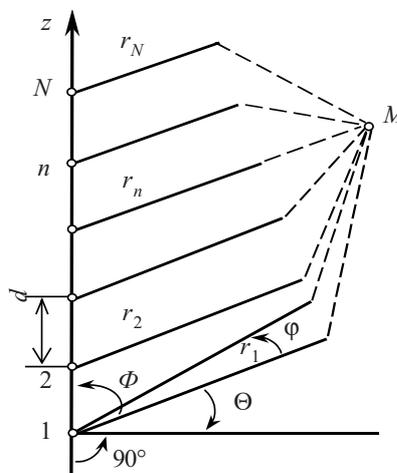


Рис. 1. Возбуждение объемных волн встречно-штыревым преобразователем

Поле вектора смещения n -го элемента решетки запишем в виде

$$\vec{U}_n = \frac{cA_0}{r_n} \exp[-i(kr_n - \psi_n)] F_0(\Theta, \varphi) \vec{e}_0,$$

где c — константа, зависящая от вида излучателя;
 A_0 и ψ_n — амплитуда и фаза звукового поля в n -м элементе;
 r_n, Θ, φ — сферические координаты произвольно выбранной точки M , r_n — расстояние от n -го элемента антенны до точки M ;
 $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число звуковой волны длиной λ ;
 $F_0(\Theta, \varphi)$ — диаграмма направленности n -го элемента;
 \vec{e}_0 — орт (единичный вектор), характеризующий поляризацию поля излучения n -го элемента.

Из теории антенных решеток известно, что диаграмма направленности всей антенны равна произведению диаграммы направленности элемента решетки на множитель антенной решетки [7]. Для множителя звуковой антенной решетки (ВШП) предложено следующее соотношение:

$$f_c = \frac{\sin \left[0,5Nkd \left(\cos \Phi - \frac{\pi}{kd} \right) \right]}{N \sin \left[0,5kd \left(\cos \Phi - \frac{\pi}{kd} \right) \right]} \quad (1)$$

Здесь Φ — угол между осью Z и направлением на точку M .

При большом числе излучателей ($N \geq 20$) значение аргумента $0,5Nkd \left(\cos \Phi - \frac{\pi}{kd} \right) = u$ в пределах главного лепестка небольшое — $0,5Nkd \left(\cos \Phi - \frac{\pi}{kd} \right) < \pi$,

поэтому можно считать $\sin u = u$ и формулу (1) переписать в виде

$$f_c = \frac{\sin(Nu)}{Nu} \quad (2)$$

Функция f_c неперриодическая и имеет одно наибольшее значение при $Nu=0$, откуда нетрудно получить направление ориентации главного лепестка диаграммы направленности ВШП:

$$\cos \Phi_{гр} = \frac{\pi}{kd} \quad (3)$$

Учитывая (1) и (3), имеем:

$$f_c(\Phi) = \frac{\sin \left[0,5Nkd \left(\cos \Phi - \cos \Phi_{гр} \right) \right]}{N \sin \left[0,5kd \left(\cos \Phi - \cos \Phi_{гр} \right) \right]} \quad (4)$$

Амплитуда боковых лепестков диаграммы направленности убывает по мере удаления от главного лепестка. Из формулы (2) следует, что амплитуда первого бокового лепестка, который определяется координатой $Nu = \pm 3\pi/2$, имеет величину, равную 0,21 от величины основного лепестка.

Проведем изменения (подстановку): $\Phi = \pi/2 - \Theta$, где Θ — угол между нормалью к плоскости, с которой возбуждается ультразвуковая волна, и направлением ее распространения (см. рис. 1). Тогда соотношения (3) и (4) можно переписать в виде

$$\sin \Theta_{гр} = \pi/kd; \quad (5)$$

$$f_c(\Theta) = \frac{\sin \left[0,5Nkd \left(\sin \Theta - \sin \Theta_{гр} \right) \right]}{N \sin \left[0,5kd \left(\sin \Theta - \sin \Theta_{гр} \right) \right]} \quad (6)$$

При $d > \Lambda/2$ линейка эквидистантных излучателей может иметь несколько максимумов излучения, равных по интенсивности главному максимуму. Эти мак-

симумы будут наблюдаться под углами, для которых выполняются следующие условия:

$$kd \left(\sin \Theta_m - \sin \Theta_{гр} \right) = m\pi, \quad m = \pm 1; \pm 2 \dots \quad (7)$$

Ближайший к нормали максимум получим при $m = -1$:

$$\sin \Theta_{-1} = -\Lambda/d + \sin \Theta_{гр}. \quad (8)$$

В случае ВШП имеем:

$$\sin \Theta_{-1} = -\pi/kd. \quad (9)$$

Из (9) следует, что максимум при $m = -1$ симметричен относительно нормали к оси решетки излучателей главному максимуму.

Полученные результаты — при рассмотрении ВШП в виде ультразвуковой решетки излучателей — полностью совпадают с результатами при строгом решении задачи возбуждения объемных звуковых волн ВШП, приведенными в работе [8, с. 290, 296]. Однако выражения, которые получаются из модели представления ВШП в виде антенной решетки, значительно проще и допускают наглядную интерпретацию при анализе диаграмм направленности звукового поля объемной волны. Кроме того, для практических целей появление дополнительных максимумов любого порядка нежелательно, поскольку вся мощность излучения должна бы сосредотачиваться в главном максимуме. Поэтому при подавлении максимумов m -го порядка можно воспользоваться методами, которые применяются в теории антенн.

Экспериментальные исследования проводились с кристаллами LiNbO_3 Z -срезы, выращенными в НПП «Карат». Погрешность определения кристаллографических направлений составляла $\pm 10'$. Использовались звукопроводы, все грани которых были отполированы, а на грани XU методом термического напыления нанесены пленки Cr-Cu , на которых с помощью фотолитографии были реализованы ВШП. Кристалл с нанесенным ВШП монтировался в корпус с СВЧ-разъемом. ВШП изготавливался так, чтобы достичь максимального согласования на центральной частоте полосы возбуждения.

При возбуждении объемных звуковых волн с поверхности кристалла ВШП угол распространения этих волн определяется соотношением (5):

$$\sin \Theta = \frac{\pi}{kd} = \frac{\Lambda}{2d} = \frac{v}{2fd}, \quad (10)$$

где Λ — длина ультразвуковой волны;
 v — скорость распространения звука;
 f — частота из рабочего диапазона.

ВШП при возбуждении объемных звуковых волн с поверхности пьезоэлектрических кристаллов не имеют резонансных характеристик, т. е. задав центральную частоту, нельзя рассчитать период ВШП. Из формулы (10) следует, что задав период преобразователя, можно возбуждать объемные звуковые волны во всем частотном диапазоне начиная с $\Lambda > 2d$ частоты $f > f'_0$, где f'_0 — резонансная частота ВШП при возбуждении поверхностных звуковых волн. При этом

будет меняться только угол распространения звуковой волны.

Поэтому центральные частоты и параметры ВШП для исследований выбирались исходя из соотношения, которое используется в акустооптике для расчета периода фазированной решетки при заданной центральной частоте [5, с. 152]:

$$d = \frac{v^2 n_e}{f_0^2 \lambda}, \quad (11)$$

где n_e — показатель преломления звукопровода;
 λ — длина волны лазерного излучения.

В нашем случае $\lambda=0,6328$ мкм. Выбор длины волны станет ясным в дальнейшем.

Нами был изготовлен ВШП с периодом 75 мкм и расстоянием между электродами 50 мкм, количеством электродов $N=20$ шт. и высотой электродов $h=2,0$ мм. При изготовлении ВШП направление электродов выбиралось параллельным оси X звукопровода. (В акустооптике период ВШП $d=75$ мкм соответствует центральной рабочей частоте $f_0=777$ МГц.) На изготовленном образце нами наблюдалась брэгговская дифракция лазерного излучения с $\lambda=0,6328$ мкм в частотном интервале 400...1200 МГц. При этом эффективность дифракции на частотах >1 ГГц резко падает и на частотах ≥ 1150 МГц находится практически на уровне фона.

Для определения направления распространения звуковой энергии при возбуждении ее с поверхности XU кристалла $LiNbO_3$ Z-среза ВШП была произведена визуализация переноса энергий «теньевым методом» [9, с. 22], усовершенствованным авторами статьи. Блок-схема стенда, который использовался для визуализации эффекта переноса энергии, представлена на рис. 2.

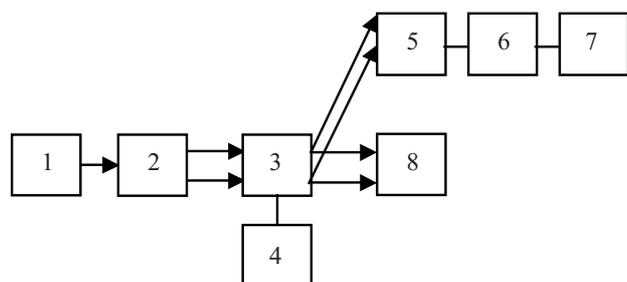


Рис. 2. Блок-схема стенда для визуализации направления переноса энергии ультразвуковой волной:
1 — лазер; 2 — коллимирующая система; 3 — звукопровод со встречно-штыревым преобразователем; 4 — генератор Г4-76А; 5 — цифровая видеокамера; 6 — компьютер; 7 — монитор; 8 — поглощающий экран

Весь стенд собирался на голографической плите СИН-1. Поляризованный пучок от одномодового лазера расширялся и фильтровался коллимирующей системой 2, после которой он полностью засвечивал звукопровод. При этом добивались, чтобы этот пучок был практически параллельным. Размеры звукопровода — $10,5 \times 12,0 \times 11,5$ мм вдоль осей X, Y, Z , соответственно. Попадая на звукопровод, свет дифрагировал на звуковой волне, которая по нему распро-

странялась. Звуковая волна возбуждалась при помощи ВШП, который был подключен к генератору СВЧ-колебаний Г4-76А. Дифрагировавший световой пучок регистрировался цифровой видеокамерой и визуализировался на мониторе с дальнейшей записью изображения на компьютер. Трудность регистрации направления переноса энергии звуковой волны, возбужденной с поверхности XU кристалла $LiNbO_3$ Z-среза, состоит в том, что дифракционная эффективность на частотах ≥ 1 ГГц составляла порядка 1% и меньше от интенсивности падающего света.

На рис. 3 представлена картина переноса звуковой энергии сдвиговой волны, возбужденной с помощью ВШП с поверхности XU кристалла $LiNbO_3$ Z-среза на частотах 950, 1050 и 1100 МГц. Из рисунка видно, что диаграмма направленности звукового поля состоит из двух симметричных относительно нормали к оси преобразователя лепестков, причем интенсивность звуковой волны в одном из них ниже, чем во втором, что, по-видимому, обусловлено неравенством ширины электродов и расстояний между ними.

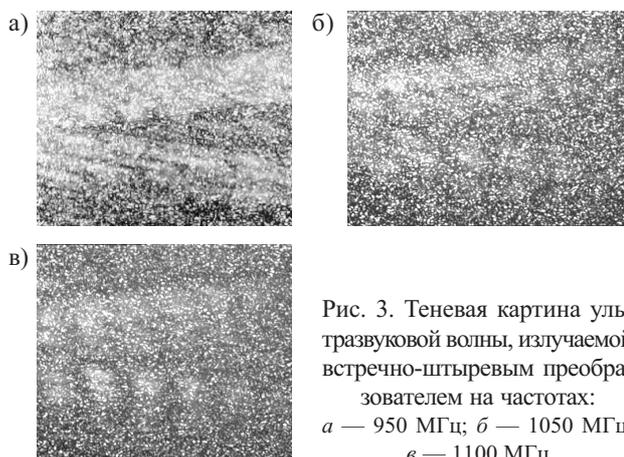


Рис. 3. Теневая картина ультразвуковой волны, излучаемой встречно-штыревым преобразователем на частотах:
а — 950 МГц; б — 1050 МГц;
в — 1100 МГц

Полученный нами экспериментальный результат подтверждает выводы, которые следуют из теории звуковой антенной решетки. Из рис. 3 также видно, что интенсивность звуковых колебаний при частотах ≥ 1050 МГц резко падает для данного ВШП, что, по нашим данным, обусловлено возрастанием интенсивности электромагнитного излучения ВШП.

На исследованных частотах был также определен угол отклонения переноса звуковой энергии от оптической оси кристалла, который составил $8+0,5^\circ$. Угол отклонения волнового фронта звуковой волны с частотой $f=1,0$ ГГц от оптической оси кристалла, рассчитанный согласно (10), равнялся $\Theta=1,38^\circ$. Таким образом, угол сноса акустического пучка на частоте 1,0 ГГц $\varphi=6,62+0,5^\circ$, что обусловлено анизотропными свойствами кристаллов $LiNbO_3$.

Исходя из уравнения Кристоффеля [4] был теоретически рассчитан угол переноса энергии акустической волны при возбуждении ее ВШП с периодом $d=75$ мкм для частоты $f=1,0$ ГГц. Величина этого угла, согласно расчету, составила $8,2^\circ$, т. е. получено хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Следовательно, для данного типа кри-

сталлов можно теоретически рассчитать угол сноса для любой частоты и для ВШП с любым d .

Полученные результаты можно использовать при конструировании акустооптических модуляторов и ультразвуковых линий задержки СВЧ-диапазона с применением кристаллов ниобата лития.

Усовершенствованный нами метод визуализации распространения ультразвуковых волн СВЧ-диапазона, которые возбуждаются фазированной решеткой излучателей, может найти применение при оптимизации излучающих свойств этих решеток.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Акустические кристаллы: Справочник / Под ред. М. П. Шаскольской.— М.: Наука, 1982.

2. Пат. 2168265 С1 RU. Сверхвысокочастотная линия задержки на объемных акустических волнах / В. В. Роздобудько, В. И. Перевозчиков, А. В. Андросов.— 2001.— Бюл. № 15.

3. Роздобудько В. В. Исследование АЧХ акустооптического СВЧ дефлектора с возбуждением звука системой встречно-штыревых преобразователей // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1991.— Т. 34, № 9.— С. 42—46.

4. Меркулов Л. Г., Яковлев Л. А. Кристаллическая ультразвуковая линия задержки с использованием отклонения луча от нормали // Акустический журнал.— 1962.— Т. VIII, вып. 2.— С. 199—203.

5. Балакший В. И., Паригин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики.— М.: Радио и связь, 1985.

6. Weis R. S., Gaylord T. K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure // Appl. Phys. A.— 1985.— Vol. 37.— P. 191—203.

7. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства.— М.: Сов. радио, 1974.

8. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах.— М.: Наука, 1982.

9. Гусев О. Б., Клуздин В. В., Тигин Д. В. Акустооптические измерения.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1987.