

УДК 534.231.2

Объемные акустические волны ультразвукового диапазона в кристаллах во вращающемся электрическом поле

С. А. ХАХОМОВ, И. В. СЕМЧЕНКО

Настоящая работа является результатом научных исследований, проводимых в Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины на протяжении последних лет. Идея использования вращающегося электрического поля для наблюдения параметрических электроакустических эффектов в кристаллах принадлежит В. Н. Белому и Б. Б. Севруку и была высказана более 15 лет назад. В дальнейшем эта идея развивалась физиками Гомельского государственного университета, где Ф. И. Федоровым, Б. В. Бокутем, А. Н. Сердюковым была создана научная школа в области оптики и акустики гиротропных сред.

Работа представляет собой попытку освещения современного этапа исследований свойств кристаллов во вращающемся электрическом поле. Интерес к данной теме обусловлен потребностью в создании различных устройств акустоэлектроники и необходимостью исследования материалов с разнообразными акустическими и пьезоэлектрическими характеристиками, изучения их структуры и физических свойств и определения областей и возможностей практического применения.

1. Нелинейные акустические явления в кристаллоакустике

Значительный прогресс теоретической акустики и оптики кристаллов с 50-х годов прошлого века обеспечило использование ковариантных (бескоординатных) методов прямого тензорного исчисления, разработанных Ф. И. Федоровым [1–4]. Дальнейшее развитие эти методы получили в нелинейной оптике и акустике в работах Б. В. Бокутя и А. Г. Хаткевича, а также В. Н. Белого, А. Н. Сердюкова, которыми, в частности, был разработан метод перехода к закрученной системе координат [5]. Последний применялся при исследовании свойств спиральных структур [6–8].

Развитие исследований различных свойств твердых тел (прежде всего нелинейной упругости, электрострикции [9, 10], а для ацентричных материалов – линейного и нелинейного пьезоэлектрических эффектов [11, 10]) началось в 50-е годы и в значительной степени было обусловлено как самим развитием теории твердого тела [12–14], так и появлением устройств твердотельной электроники.

В зависимости от свойств среды и от характера излучения, которое является носителем информации, начали развиваться различные направления функциональной электроники: акустоэлектроника, акустооптика, магнитоэлектроника и т. д. В акустоэлектронике, использующей взаимодействие распространяющихся высокочастотных упругих колебаний с веществом, на основе различных физических явлений был построен целый класс практически важных приборов и устройств (ультразвуковые линии задержки, твердотельные усилители, фильтры и т. д.) [15–18].

К применению нелинейных акустических эффектов для функциональной обработки информации привели исследования, начало которым было положено в конце 60-х годов экспериментальным наблюдением взаимодействия встречных поверхностных акустических волн в кристалле ниобата лития [19]. Еще один класс нелинейных акустических устройств, позволяющих осуществлять обработку информации, составляют устройства, использующие эффект электроакустической памяти [20, 21]. В этом случае могут осуществляться запомина-

ние и считывание сигнала с сохранением информации о его структуре. Поэтому такие устройства в некотором роде аналогичны голографическим и их можно рассматривать как одномерные голографические системы [22]. При этом имеется возможность создания программируемых устройств, что обеспечивается сменой опорного сигнала.

Начиная с 60-х годов, с появлением лазеров и мощных источников когерентного звука с частотами в десятки мегагерц и выше, явления взаимодействия света и звука приобрели также важное практическое применение, с одной стороны, как способы эффективного управления световым излучением (отклонения, сканирования, модуляции и т. п.), а с другой стороны, как оптические методы обработки информации, представленной в виде акустических сигналов. Сформировалась акустооптика как самостоятельная область.

В конце 60-х годов в связи с бурным развитием акустоэлектроники возник ряд новых аспектов этих явлений, связанных, в частности, с особенностями акустооптического взаимодействия в проводящих кристаллах [23, 24], с усилением акустических флуктуаций при сверхзвуковом дрейфе электронов [11, 24, 25], возникновением специфических акустоэлектронных нелинейных эффектов [25, 26]. Все это позволило существенно расширить диапазон частот электромагнитного излучения, управляемого методами акустооптики, за пределы традиционного «оптического».

Начиная с 70-х годов, необходимость разработки эффективных устройств акустоэлектроники стимулировала поисковые работы по получению и исследованию монокристаллов с достаточно хорошими упругими, диэлектрическими, акустическими свойствами. Появилось большое количество работ по монокристаллам, исследованию их свойств и возможному использованию в самых различных устройствах [27] (см. также библиографию к книге [27]).

2. Взаимодействие акустических волн с переменным электрическим полем.

Обращение волнового фронта

В 70-х годах появились первые работы по наблюдению параметрического взаимодействия акустических волн с переменным электрическим полем [28]. Нелинейные параметрические взаимодействия объемных акустических волн с переменными электрическими полями в твердых телах нашли широкое применение для реализации многофункциональных устройств обработки сигналов [29]. В работах [30, 31] эффект акустоэлектромагнитного параметрического взаимодействия в сегнетоэлектрических резонаторах из KTaO_3 был положен в основу возбуждения звука.

Нелинейное электроакустическое взаимодействие в LiNbO_3 , открытое в [28] и описанное как трехволновой процесс взаимодействия двух противоположно распространяющихся волн частоты ω и электрического поля частоты 2ω , применялось преимущественно для усиления и временного обращения сигналов. В 80-е годы авторы работ [32, 33] показали, что распространяющаяся обратно акустическая волна при нелинейном электроакустическом взаимодействии сопряжена по фазе падающей акустической волне, и вызвали интерес к изучению возможности реализации обращения волнового фронта в акустике.

Обращение волнового фронта – эффект изменения направления распространения волны в каждой ее точке на противоположное с сохранением всех других ее характеристик (формы фронта, распределения амплитуды вдоль него) был хорошо известен в оптике. Математически обращению волнового фронта соответствует изменение знака фазы или сопряжение комплексной амплитуды волны. Важное свойство обращенной волны состоит в том, что она фокусируется в ту же точку, где расположен источник первичной волны. В однородной среде это свойство представляется очевидным, но оно сохраняется и в неоднородной среде. Именно поэтому устройства обращения волнового фронта представляли большой практический интерес, так как они открывали возможности восстановления фазовой структуры поля с неоднородностями. С точки зрения общих принципов, возможность реализации обращения волнового фронта в акустике не вызывала сомнений, так как это – общеволновое явление, стоял лишь вопрос, как именно осуществить обращение волнового фронта в акустике.

В 80-е годы был предложен и продемонстрирован целый ряд методов, реализующих обращение волнового фронта в акустике (первое экспериментальное наблюдение в [34]). Они включали использование поверхности жидкости [34, 35], газовых пузырьков [36–38], тепловых эффектов [39] и жидкости, содержащей микрочастицы [40]. В [41] была обсуждена возможность реализации обращения волнового фронта в эффекте электроакустического эха, наблюдаемом в пьезоэлектриках [42–44]. Собственно параметрический механизм усиления звуковых волн за счет переменного электрического поля накачки в сегнетоэлектриках был предложен в [45] и впервые реализован экспериментально в [28] (см. также [46]). Однако в этих работах вопрос об обращении волнового фронта не рассматривался. В [33] была продемонстрирована экспериментальная реализация модели параметрического обращающего фазу усилителя звука на ниобате лития. В дальнейшем исследование фазового сопряжения при нелинейном электроакустическом взаимодействии в этом кристалле проводилось теоретически в [47] и экспериментально в работах [48–53]. В [52, 53] сопряженная по фазе волна генерировалась при электроакустическом взаимодействии в пьезокерамике системы ЦТС, при этом коэффициент отражения был на три порядка выше, чем в ниобате лития.

3. Влияние постоянного электрического поля на упругие свойства кристаллов

Влияние постоянного электрического поля на упругие свойства кристаллов также интенсивно изучалось в связи с возможностью управления распространением акустических волн [54–60]. Было показано, что внешнее статическое воздействие, приложенное к нелинейному кристаллу, приводит к изменению его акустических свойств, поскольку эффективные материальные константы становятся зависящими от величины и ориентации внешнего воздействия [54, 55, 61]. При этом в соответствии с принципом Кюри кристалл переходит из одного кристаллографического класса в другой с более низкой симметрией.

Изучение влияния электрических полей на упругие свойства кристаллов LiNbO_3 и KNbPO_4 проводилось в [57], на свойства кварца – в [62–66].

С 70-х годов возрос интерес к исследованию поляризационных эффектов в кристаллоакустике и, в частности, к управлению поляризацией упругих волн с помощью внешних воздействий [67]. Было показано, что изменение эллиптической поляризации и поворот плоскости поляризации акустической волны могут происходить под действием механических напряжений (акустоупругость) [68] или электрического поля (электроупругость) [69]. В [70] была рассмотрена возможность создания искусственной анизотропии управляемого пьезоэлемента с помощью его электрической нагрузки. В [71] было исследовано распространение поперечных акустических волн в управляемых электрическим полем спиральных структурах с большими значениями диэлектрической проницаемости. Показана возможность использования таких структур для управления поляризацией упругих волн. В [72] исследована поляризация волн в акустически гиротропных кристаллах. Рассмотрены случаи, когда вектор гирации ортогонален вектору поляризации какой-либо волны при отсутствии гиротропии и когда направления распространения близки к акустическим осям, где гиротропия проявляется наиболее сильно.

4. Формирование вращающейся акустической анизотропии в кристаллах различных классов симметрии

Как уже упоминалось выше, в работе [73] было отмечено, что для осуществления электроакустических взаимодействий в кристаллах с нелинейным пьезоэффектом требуются переменные СВЧ-поля с высокой напряженностью [28, 42, 45]. В материалах с электрострикционной нелинейностью пороговые поля значительно меньше [74], однако из-за высокой диэлектрической проницаемости в СВЧ-полях имеют место значительные диэлектрические потери. В этой связи авторы [73] предложили использование постоянных по величине, но вращающихся электрических полей.

ротропных средах с периодической структурой состоит в использовании уравнений Максвелла и уравнений упругости, дополненных феноменологическими материальными уравнениями. При выборе уравнений связи, характеризующих свойства среды, используются принцип симметрии кинетических коэффициентов Онзагера–Казимира и закон сохранения энергии поля, а также учитывается кристаллографическая симметрия среды.

Упругие волны в кристаллах с вращающейся структурой исследованы с помощью перехода к вращающейся системе координат, сопровождающей внешнее воздействующее поле. Вследствие симметрии материальных тензоров, характеризующих кристалл, свойства среды в такой системе координат не зависят от времени и пространственных координат. Это обстоятельство позволило искать точные решения волнового уравнения в виде плоских монохроматических волн. В результате дифференциальное волновое уравнение было сведено к системе алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами. Из условия существования ненулевых решений этой системы следует дисперсионное алгебраическое уравнение четвертой степени, корнями которого являются волновые числа собственных мод электромагнитного или акустического поля.

Описанная выше методика последовательно использована авторами при исследовании электроакустического и акустоэлектронного взаимодействия в кристаллах, помещенных во вращающееся электрическое поле. Таким образом, был разработан аналитический метод, который позволяет корректно решать широкий круг задач, касающихся свойств различных сред в присутствии вращающихся полей [77–94].

6. Подавление поглощения ультразвука вращающимся электрическим полем

Особое внимание уделяется эффекту подавления поглощения акустических волн в сегнетокерамике во вращающемся электрическом поле. Он может проявляться в условиях интерференции падающей акустической волны и обращенной акустической волны, генерируемой в сегнетокерамике вращающимся электрическим полем. В результате наложения этих волн может образоваться стоячая ультразвуковая волна, по отношению к которой вязкие свойства среды проявляются очень слабо. Вследствие такого подавления поглощения ультразвука может иметь место гигантское усиление прошедшей и обращенной акустических волн как результат высокоэффективной передачи энергии вращающегося электрического поля ультразвуку.

Явления подавления либо частичного ослабления поглощения энергии поля веществом при распространении электромагнитного поля в пространственно-периодических средах достаточно хорошо известны [95, 96]. Например, эффект Бормана, заключающийся в подавлении поглощения рентгеновских лучей при их дифракции в кристалле, является следствием образования стоячей электромагнитной волны в результате интерференции падающей и дифрагированной волн. При этом нули амплитуды стоячей волны совпадают с узлами кристаллической решетки, т. е. с центрами поглощения кристалла, дискретно расположенными в пространстве.

Ослабление поглощения света имеет место также при дифракции световых волн в холестерическом жидком кристалле (ХЖК), осцилляторы поглощения молекул которого периодически изменяют свою ориентацию в пространстве. В этом случае аномально слабое поглощение света обусловлено поляризационными свойствами электромагнитного поля в ХЖК. При распространении световой волны вдоль оси холестерической спирали собственные моды электромагнитного поля на одной из границ частотной области брэгговского отражения оказываются поляризованными ортогонально осциллятору поглощения во всем объеме кристалла [97]. Указанные явления аномально слабого поглощения проявляются в условиях резонансного взаимодействия электромагнитных волн с пространственно-периодической структурой кристалла.

Ранее была показана возможность ослабления поглощения электромагнитных волн также при их распространении в кристалле с нестационарной одноосной структурой, инду-

цированной вращающимся электрическим полем. Свойства такого кристалла, в том числе ориентация осциллятора поглощения, с течением времени периодически изменяются по гармоническому закону [98].

В работах [78, 80, 84] исследуется эффект подавления поглощения акустических волн при их резонансном взаимодействии с вращающимся электрическим полем в кристаллах с аномально высокой диэлектрической проницаемостью. Показано, что, как и для электромагнитного поля, возникновение эффекта является следствием взаимодействия падающей акустической волны и возникающей в кристалле обращенной волны. Установлено, что эффект подавления поглощения обусловлен структурой акустического поля, собственные моды которого имеют вид стоячих волн во вращающейся системе координат, сопровождающей электрическое поле.

В данном случае среды с индуцированной вращающейся пространственно однородной акустической анизотропией представляют собой акустический аналог пространственно-периодических сред и в них проявляются эффекты, характерные для последних.

7. Практическое применение

Полученные результаты могут быть применены для измерения параметров кристаллов, в том числе акустической вращательной способности, управления плоскостью поляризации ультразвука, обращения волнового фронта, преобразования частоты, усиления и генерации акустических волн.

На рис. 2 представлена принципиальная схема запатентованного устройства для поворота плоскости поляризации или усиления ультразвуковой волны [99, 101].

Преобразователь 1 служит для возбуждения в управляемом звукопроводе 2 линейно поляризованной сдвиговой волны. Пары электродов 3 и 4 подключаются к генератору переменного напряжения 5 и фазовращателю 6 таким образом, что электрическое напряжение, подаваемое на одну пару пластин, отличается по фазе на $\pi/2$ от напряжения, подаваемого на другую пару пластин. При этом в результате суперпозиции взаимно перпендикулярных электрических полей, изменяющихся во времени по гармоническому закону с относительным сдвигом фаз, равным $\pi/2$, внутри звукопровода возникает нестационарное электрическое поле. Его вектор напряженности вращается с течением времени вокруг оси звукопровода с частотой Ω , равной частоте напряжения, вырабатываемого генератором.

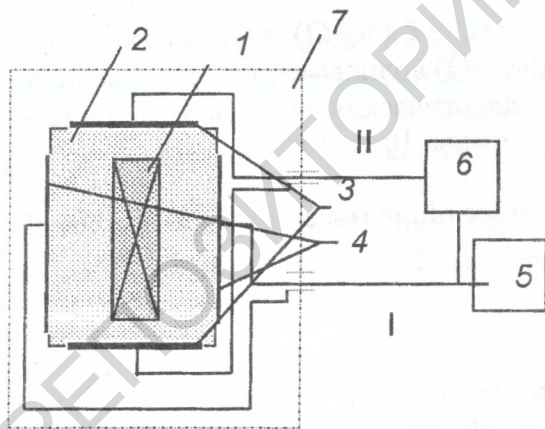


Рис. 2. Схема устройства для поворота плоскости поляризации ультразвуковой волны: 1 – пьезопреобразователь; 2 – звукопровод; 3, 4 – электроды; 5 – генератор; 6 – фазовращатель; 7 – звукопровод с пьезопреобразователем и электродами

Поскольку звукопровод выполнен из неполяризованной сегнетокерамики, внешнее электрическое поле оказывает влияние на скорость упругой волны.

Если частота Ω переменного напряжения близка к частоте ультразвуковой волны ω и удовле-

творяет неравенству (5),

$$\delta^2 \omega_0^2 (\omega_0 - 2\Omega) \ll 4 \bar{\Lambda}^2 \Omega^2 (\omega_0 - \Omega)^2, \quad (5)$$

то ультразвук в управляемом звукопроводе 2 распространяется в виде суперпозиции двух циркулярно поляризованных волн, имеющих одинаковую амплитуду смещений, но противоположные направления обращения. Это приводит к появлению разности фаз между право- и левциркулярной компонентами упругих смещений, благодаря чему распространение упругой волны в звукопроводе сопровождается поворотом ее плоскости поляризации. Угол поворота плоскости поляризации ультразвука на выходной грани звукопровода опреде-

ляется выражением (6)

$$\Phi = [k_1(\omega_0 + \Omega) - k_2(\omega_0 - \Omega)]L/2 = -\sqrt{\rho} \frac{\omega_0^4 \delta^2 L}{8\Lambda^{3/2} \Omega(\omega_0^2 - \Omega^2)}, \quad (6)$$

где L — толщина кристалла.

При использовании данного способа поворота плоскости поляризации акустических волн значительно облегчается перенастройка устройства вращения плоскости поляризации для ультразвука другой частоты, так как акустическая волна на выходе из звукопровода остается линейно поляризованной, а не становится эллиптической, как в ранее предложенном устройстве [100]. Поэтому отпадает необходимость расположения на выходе из звукопровода плоскопараллельной пластинки из ниобата лития. Ее толщина однозначно определяется частотой ультразвука, его скоростью в направлении акустической оси и углом поворота плоскости поляризации. Отказ от использования пластинки из кристалла ниобата лития облегчает перенастройку устройства для ультразвука другой частоты. Что касается ранее предложенного устройства, то указанная перенастройка для него может быть осуществлена только путем замены пластинки из кристалла на новую, толщина которой соответствует изменившимся параметрам ультразвука.

Если частоту вращения и напряженность электрического поля устанавливают в соответствии с выражениями

$$\Omega = \omega_0,$$

$$E_{\text{пор}}^2 > \frac{2\eta_{44}\Omega(\sqrt{(\alpha_{155} - \alpha_{144})^2 + \Omega^2}(\beta_{155} - \beta_{144})^2 + \Omega(\beta_{155} + \beta_{144}))}{(\alpha_{155} - \alpha_{144})^2 - 4\Omega^2\beta_{155}\beta_{144}}$$

где ω_0 — частота ультразвуковой волны, Ω — частота вращения электрического поля, η_{44} — компонента тензора вязкости, α_{144} , α_{155} , β_{144} , β_{155} — компоненты тензора, учитывающие электрострикционное воздействие поля E на упругие постоянные среды, β_{144} , β_{155} — компоненты тензора, учитывающие электрострикционное воздействие поля E на вязкость среды, и длина звукопровода изготовлена в соответствии с выражением

$$L_s = (\zeta_1 - \zeta_2 + 2\pi s) / [k_1(\omega_0 + \Omega) - k_2(\omega_0 - \Omega)]$$

где ζ_1 и ζ_2 — аргументы комплексных эллиптичностей $\xi_1(\omega_0 + \Omega)$ и $\xi_2(\omega_0 - \Omega)$, параметр s принимает значения из множества целых чисел, $k_1(\omega_0 + \Omega)$ и $k_2(\omega_0 - \Omega)$ — волновые числа собственных мод акустического поля, тогда коэффициент усиления акустических волн при соответствующих толщинах кристалла может достигать значений порядка $10^4 - 10^5$ [78, 101].

Abstract. The authors study the results of the contemporary stage of the researches of properties of the crystals in a rotating electric field.

Литература

1. Ф. И. Федоров, *Оптика анизотропных сред*, Мн., 1958.
2. Ф. И. Федоров, *Теория упругих волн в кристаллах*, М., 1965.
3. Ф. И. Федоров, В. В. Филиппов, *Отражение и преломление света прозрачными кристаллами*, Мн., 1976.
4. Ф. И. Федоров, *Теория гиротропии*. Мн., 1976.
5. В. Н. Белый, А. Н. Сердюков, *К теории распространения электромагнитных волн в закрученных кристаллах*, Докл. АН БССР, **18**, № 5 (1974), 402–404.
6. И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, *Синхронная генерация второй гармоники в холестерических жидких кристаллах. Приближение связанных волн*, Журн. прикл. спектроскопии, **39**, № 5 (1983), 768–772.

7. И. В. Семченко, А.Н. Сердюков, *Нелинейная гиротропия жидких кристаллов*, Журн. прикл. спектроскопии, **38**, № 2 (1983), 292–296.
8. И. В. Семченко, *Распространение и взаимодействие электромагнитных волн в средах со спиральной структурой*, Дис. канд. физ.-мат. наук, Гомель, 1984.
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, М., 1982.
10. И. С. Желудев, *Физика кристаллических диэлектриков*, М., 1968.
11. Л. Бергман, *Ультразвук и его применение в науке и технике*, М., 1956.
12. Дж. Най, *Физические свойства кристаллов*, М., 1967.
13. Ч. Киттель, *Квантовая теория твердых тел*, М., 1967.
14. Дж. Займан, *Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах*, М., 1962.
15. Б. Н. Пирогов, В. И. Рогачев, Г. Ф. Сиротин, Г. К. Ульянов, *Функциональные акустические устройства обработки сигналов*, Изв. вузов. Радиоэлектроника, **19**, № 3 (1976), 3–14.
16. R. W. Dixon, *Acoustooptic interaction and devices*, IEEE Trans., ED-17, № 13 (1970), 229–233.
17. R. C. Smith, *Communications systems benefit from monolithic crystal filters* // Electronics. 1972. Vol. 45, N 3. P. 48–54.
18. Б. А. Коршак, В. Е. Лямов, И. Ю. Солодов, *Акустоэлектрическое «последствие» при взаимодействии поверхностных акустических волн в слоистой структуре пьезоэлектрик–полупроводник*, Письма в ЖЭТФ, **23**, № 8 (1976), 438–431.
19. L. O. Svaasand, *Interaction between elastic surface waves in piezoelectric materials*, Appl. Phys. Lett., **15** (1969), 300–303.
20. A. Bers, J. H. Cafarella, *Surface state memory in surface acoustoelectric correlator*, Appl. Phys. Lett., **25**, № 3 (1974), 133–135.
21. Hayakawa H., G. S. Kino, *Storage of acoustic signals in surface states in silicon*, Appl. Phys. Lett., **25**, № 4 (1974), 178–180.
22. Л. В. Бабин, С. Б. Гуревич, *Акустическая голография*, Акустич. журн., **17**, № 4 (1971), 489–512.
23. В. Л. Гуревич, *Теория акустических свойств пьезоэлектрических полупроводников*, Физ. и техн. полупроводн., **2**, № 11 (1968), 1557–1592.
24. С.И. Пекар, *Электрон-фононное взаимодействие, пропорциональное внешнему приложенному полю и усиление звука в полупроводниках*, Журн. эксперим. и теор. физики, **49**, № 2 (1965), 621–669.
25. В. И. Пустовойт, *Взаимодействие электронных потоков с упругими волнами решетки*, Успехи физ. наук, **97**, № 2 (1969), 257–276.
26. Ю. В. Гуляев, *К вопросу об электрон-фононном взаимодействии, пропорциональном внешнему приложенному полю*, Физ. тверд. тела, **9**, № 6 (1967), 1816–1818.
27. *Акустические кристаллы: Справочник* / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, В. В. Чкалова и др.: Под ред. М. П. Шаскольской. М., 1982.
28. R. B. Thompson, C. F. Quate, *Nonlinear interaction of microwave electric fields and sound in LiNbO₃*, J. Appl. Phys., **42**, № 3 (1971), 907–919.
29. Б. А. Коршак, В. Е. Лямов, Ю. И. Солодов, В. Г. Еленский, *Нелинейные акустические устройства обработки сигнальной информации*, Зарубежная радиоэлектроника, № 1 (1981), 58–77.
30. Г. В. Белокопытов, Н. В. Иванов, В. Н. Семененко, Г. В. Студенникова, *Влияние тепловых расстройек на условия возникновения стрикционной параметрической генерации звука*, Журн. техн. физики, **59**, № 4 (1989), 182–184.
31. Г. В. Белокопытов, Н. В. Иванов, В. А. Чистяев, *Параметрическое стрикционное возбуждение ультразвука в диэлектрических резонаторах СВЧ-диапазона*, Акустич. журн., **35**, № 2 (1989), 218–222.
32. V. I. Reshetzky, *Phase conjugate reflection and amplification of a bulk acoustic wave in piezoelectric crystals*, J. Phys. C., **15** (1984), 887–893.
33. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, Ю. Е. Казаров, *Экспериментальная реализация модели параметрического обращающего фазу усилителя звука (ПОФУЗ) на ниобате лития*, Письма в ЖТФ, **8**, № 9 (1982), 546–549.

34. Н. Л. Андреева, Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, К. Каршиев, *Экспериментальное наблюдение явления обращения волнового фронта звука на поверхности жидкости*, Письма в ЖТФ, **8**, № 2 (1982), 104–108.
35. Ф. В. Бункин, Ю. А. Кравцов, Г. А. Ляхов, *Акустические аналоги нелинейных оптических явлений*, Успехи физ. наук, **149**, № 3 (1986), 391–411.
36. Е. А. Заболотская, *Обращение волнового фронта звуковых пучков при четырехфононном взаимодействии в жидкости с газовыми пузырьками*, Акустич. журн., **30**, № 6 (1984), 777–780.
37. Д. В. Власов, Е. А. Заболотская, Ю. А. Кравцов, *Обращение волнового фронта в воде с пузырьками*, Акустич. журн., **29**, № 1 (1983), 118–120.
38. Л. М. Кустов, В. Е. Назаров, А. М. Сутин, *Обращение волнового фронта акустической волны на пузырьковом слое*, Акустич. журн., **31**, № 6 (1985), 837–839.
39. Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, Е. А. Заболотская, Ю. А. Кравцов, *Обращение волнового фронта звуковых пучков при четырехфононном взаимодействии с температурными волнами*, Акустич. журн., **28**, № 6 (1982), 743–745.
40. T. Sato, H. Kataoka, T. Nakayama, Y. Yamakoshi, *Ultrasonic phase conjugation using micro particle suspended cell and its application*, Acoustical Imaging, **17** (1989), 361–365.
41. Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, Ю. А. Кравцов, *К вопросу об обращении волнового фронта звука с усилением обращенной волны*, Квант. электроника, **8**, № 5 (1981), 1144–1145.
42. Н. Н. Крайник, С. Н. Попов, Г. А. Смоленский, *Фононное (электроакустическое) эхо в кристаллах*, Акустич. журн., **22**, № 1 (1976), 146–148.
43. J. Joffrin, A. Levelut, *Boson echoes: a new tool to study phonon interaction*, Phys. Rev. Lett., **29**, № 19 (1972), 1325–1327.
44. N. S. Shiren, R. L. Melcher, D. K. Garrod, T. G. Kazyaka, *Echo phenomena in piezoelectric crystals*, Phys. Rev. Lett., **31**, № 13 (1973), 819–822.
45. А. А. Чабан, *Неустойчивость упругих колебаний в пьезоэлектриках в переменном электрическом поле*, Письма в ЖЭТФ, **6**, № 7 (1967), 967–969.
46. M. Luukkala, J. Surakka, *Acoustic convolution and correlation and the associated nonlinearity parameters in LiNbO₃*, J. Appl. Phys., **43**, № 6 (1972), 2510–2518.
47. I. L. Bajak, *Nonlinear interaction of acoustic vibrations and high frequency electric field*, Wiss. Beitr. M. Luther – Univ., Halle – Wittenberg. O., № 26 (1989), 83–90.
48. M. Ohno, *Generation of acoustic phase conjugate waves using nonlinear electroacoustic interaction in LiNbO₃*, Appl. Phys. Lett., **54**, № 20 (1989), 1979–1980.
49. M. Ohno, *Wave front reversal in acoustic phase conjugation by nonlinear electroacoustic interaction in LiNbO₃*, Appl. Phys. Lett., **55**, № 9 (1989), 832–833.
50. M. Ohno, K. Takagi, *Schlieren visualization of acoustic phase generated by nonlinear electroacoustic interaction in LiNbO₃*, Appl. Phys. Lett., **60**, № 1 (1989), 29–31.
51. M. Ohno, *Acoustic phase conjugation using nonlinear electroacoustic interaction and its application to scanning acoustic imaging systems*, Acoustical Imaging., **18** (1991), 65–71.
52. M. Ohno, *Generation of acoustic phase conjugate waves in nonlinear piezoelectric media*, Adv. Nonlinear Acoust.: 13th Int. Symp. Nonlinear. Acoust., Bergen, June 28–July 2, 1993. Singapore etc., 1993, 484–489.
53. M. Ohno, Takagi K. *High-efficiency generation of acoustic phase generate waves by piezoelectricity of PZT ceramics*, Proc. of Ultrasonics International'93. Austria: Vienna, 1993, 97.
54. В. Е. Лямов, *Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах*, Москва.
55. Y. Cho, K. Yamanouchi, *Nonlinear, elastic, piezoelectric, electrostrictive and dielectric constants of lithium niobate*, J. Appl. Phys., **61**, № 3 (1987), 875–887.
56. Н. В. Переломова, С. И. Чижикова, Б. Н. Клименко, В. Н. Любимов, *Зависимость скорости упругих волн от направления распространения для некоторых кристаллов в электрическом поле*, Кристаллография, **19**, № 6 (1974), 1220–1224.
57. В. С. Петраков, Н. Г. Сорокин, С. И. Чижиков и др., *Влияние электрических полей на упругие свойства кристаллов KН₂РО₄ и LiNbO₃*, Изв. АН СССР, Сер. физ., **39**, № 5 (1975), 974–977.

58. В. С. Петраков, Н. Г. Сорокин, С. И. Чижиков и др., *Влияние электрических полей на распространение гиперзвуковых волн в кристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3* , Кристаллография, **24**, № 4 (1979), 860–863.
59. А. А. Блистанов, В. С. Петраков, Н. Г. Сорокин и др., *Нелинейное упругоэлектрическое взаимодействие в нецентросимметричных кристаллах*, Письма в ЖЭТФ, **26**, № 3 (1977), 141–144.
60. Б. А. Агишев, И. А. Дерюгин, В. В. Леманов, Н. К. Юшин, *Электроакустическое взаимодействие в пьезоэлектриках*, Физ. тверд. тела, **18**, № 4 (1976), 1117–1120.
61. В. Н. Белый, Б. Б. Севрук, *Особенности наведенной электрическим полем акустической анизотропии в центросимметричных кристаллах с большой диэлектрической проницаемостью*, Кристаллография, **28**, № 5 (1983), 925–931.
62. K. Hruska, L. Janik, *Change in elastic coefficients and moduli of α -quartz in electric field*, Czechosl. J. Phys., **18**, № 1 (1968), 112–116.
63. Carl K. Hruska, Ng Peggy, *Material nonlinearities in quartz determined by the transit-time method using direct current field interactions*, J. Acoust. Soc. Amer., **93**, № 3 (1993), 1426–1430.
64. C. L. Julian, F. O. Lane, *Calculation of the piezoelectric constants of α -quartz on Born's theory*, J. Appl. Phys., **39**, № 5 (1968), 2316–2324.
65. E. Kittinger, G. Reider, J. Tichy, *Dependence of ultrasonic propagation velocities and transit times on an electric biasing field in alpha quartz*, J. Acoust. Soc. Am., **1983**, № 6 (1983), 1995–1999.
66. E. Kittinger, J. Tichy, *Symmetry of effective electroelastic tensor for point group 32*, Phys. Rev. Lett., **28**, № 12 (1983), 7321–7322.
67. К. Н. Ермилин, В. Е. Лямов, Б. М. Прохоров, *Поляризационные эффекты в линейной и нелинейной кристаллоакустике*, Акустич. журн., **25**, № 2 (1979), 161–179.
68. Л. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца, *Введение в акустоупругость*, Киев, 1977.
69. Л. Ф. Барышников, В. Е. Лямов, *Исследование эллиптической поляризации акустических волн в пьезокристаллах, возникающей под действием электрического поля*, Акустич. журн., **26**, № 6 (1980), 824–827.
70. Е. К. Грищенко, *Искусственная акустическая анизотропия управляемого пьезоэлемента*, Акустич. журн., **22** (1976), 693–697.
71. В. Н. Белый, Б. Б. Севрук, *Управление поляризацией упругих волн электрическим полем, создающим спиральную анизотропию*, Акустич. журн., **29**, № 2 (1983), 157–161.
72. С. Н. Курилкина, А. Г. Хаткевич, *Поляризация волн в акустически гиротропных кристаллах*, Кристаллография, **33**, № 2 (1988), 496–498.
73. В. Н. Белый, Б. Б. Севрук, *Параметрические электроакустические эффекты в кристаллах с индуцированной внешним электрическим полем вращающейся акустической анизотропией*, Журн. техн. физики, **57**, № 2 (1987), 336–340.
74. Г. Н. Бурлак, Н. Я. Коцаренко, *Об одном типе параметрической неустойчивости акустических волн в твердых телах*, Физ. тверд. тела, **23**, № 2 (1981), 641–643.
75. М. П. Зайцева, Ю. И. Кокорин, Ю. М. Сандлер и др., *Нелинейные электромеханические свойства ацентричных кристаллов*, Новосибирск, 1986.
76. Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская, *Основы кристаллофизики*, Москва, 1979.
77. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, *Взаимодействие ультразвука с вращающимся электрическим полем в кристаллах различных классов симметрии*, Кристаллография, **38**, № 6 (1993), 19–24.
78. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, *Объемные акустические волны в кристаллах во вращающемся электрическом поле*, Минск, Беларуская навука, 1998.
79. И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, С. А. Хахомов, *Поворот плоскости поляризации ультразвуковой волны во вращающемся электрическом поле*, Сб.: Волны и дифракция. Москва, **1** (1990), 352–354.
80. И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, С. А. Хахомов, *Подавление поглощения акустических волн при их резонансном взаимодействии с вращающимся электрическим полем*, Сб.: Ковариантные методы в теоретической физике, Оптика и акустика, Мн., 1991, С. 64–70.

81. И. В. Семченко, А.Н. Сердюков, С. А. Хахомов, *Влияние вязкости среды на усиление акустических волн в кристаллах в присутствии вращающегося электрического поля*, Кристаллография, **36**, № 2 (1991), 298–303.
82. I. V. Semchenko, A. N. Serdyukov, S. A. Khakhomov, *Acoustic waves emission and amplification in ferroelectric ceramic layer with nonstationary anisotropy induced by the rotating electric field*, Second int. cong. on recent developments in air – and structure – borne sound and vibration: Proc. – March 4–6, 1992, Auburn Univ., USA. P. 1687–1694.
83. И. В. Семченко, А.Н. Сердюков, С. А. Хахомов, *Прохождение акустических волн через слой сегнетокерамики с нестационарной анизотропией, индуцированной вращающимся электрическим полем*, Вестн. Бел. ун-та, Сер. 1. Физ., матем., механ., № 3 (1992), 16–21.
84. И. В. Семченко, А.Н. Сердюков, С. А. Хахомов, *Усиление акустических волн в кристалле, помещенном во вращающееся электрическое поле*, Кристаллография, **38**, № 1 (1993), 144–149.
85. I. V. Semchenko, B. B. Sevruck, S. A. Khakhomov, *Acoustoelectron interaction in conductor crystal of ferroelectric ceramic in the condition of inducing of piezoelectric, anisotropic and gyrotropic properties by the rotating electric field*, Seminar on electrodynamics of chiral and bianisotropic media «Bianisotropics 93»: Proc., ed. by A. Sihvola. 12–14 October, 1993. Gomel, Belarus, 93–96.
86. S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, B. B. Sevruck, *Acoustoelectron interaction in piezoelectric semiconductors: chiral properties induced by the rotating electric field*, 3rd Int. Workshop on Chiral, Bi-isotropic and Bi-anisotropic Media «Chiral 94»: Proc., ed. by F. Mariotte. Perigueux, France. May 18–20, 1994, 445–450.
87. И. В. Семченко, Б. Б. Севрук, С. А. Хахомов, *Электроакустическое взаимодействие в сегнетокерамике в присутствии вращающегося электрического поля*, Кристаллография, **39**, № 6 (1994), 1088–1091.
88. S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, *The amplification of ultrasound in semiconductors by the electron drift in condition of forming of chiral properties by the rotating electric field*, 4th Int. Conference on Chiral Media «Chiral 95»: Proceedings, ed. by A. Sihvola. Pennsylvania, USA. October 12–14, 1995, 139–142.
89. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Б. Б. Севрук, *Частотная зависимость взаимодействия ультразвука с вращающимся электрическим полем в проводящей сегнетокерамике* // Весці АН Беларусі, Сер. фіз.-мат. навук, № 4 (1995), 44–50.
90. S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, *The influence of induced chiral properties on the transformation of polarization of acoustic waves in piezoelectric semiconductors*, In: Advances in Complex Electromagnetic Materials, ed. by A. Priou, Kluwer Academic Publishers, 1997, 219–226.
91. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, *Влияние дрейфа носителей заряда на резонансное взаимодействие акустических волн с вращающимся электрическим полем в пьезополупроводниках*, Кристаллография, **42**, № 2 (1997), 221–224.
92. С. А. Хахомов, И. В. Семченко, *Влияние пространственной дисперсии на распространение акустических волн в кристаллах в присутствии вращающегося электрического поля*, Сб.: Ковариантные методы в теоретической физике, Оптика и акустика, Мн., 1996, 99–106.
93. S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, *Spatial dispersion influence on acoustic waves propagation in crystals with chiral properties induced by the rotating electric field*, Proc. of Bianisotropics' 97, ed. by W. Weiglhofer. Glasgow, Great Britain. June 5–7, 1997, 81–84.
94. S. A. Khakhomov, *Spatial dispersion influence on acoustic waves transmission and reflection in semiconductors with chiral properties induced by the rotating electric field*, Proc. of Bianisotropics' 98, ed. by A. Jacob. Braunschweig, Germany. June 3–6, 1998, 141–144.
95. З. Г. Пинскер, *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах*, Москва, 1974.
96. Ш. Чжан, *Многоволновая дифракция рентгеновских лучей в кристаллах*, Москва, 1987.
97. В. А. Беляков, А. С. Сонин, *Оптика холестерических жидких кристаллов*, Москва, 1982.

98. И. Н. Ахраменко, И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, *Особенности распространения электромагнитных волн в поглощающем естественно гиротропном кристалле с индуцированной одноосной нестационарной анизотропией*, Кристаллография, **34**, № 6 (1989), 1349–1353.

99. Патент РФ. *Способ и устройство для поворота плоскости поляризации ультразвуковой волны*, Семченко И. В., Сердюков А. Н., Хахомов С. А. Изобретения, № 2123895; Заявл. 27. 07. 94 Оpubл. 27. 12. 98, Бюл. № 36.

100. *Устройство поворота плоскости поляризации ультразвуковой волны*, А. С. SU 1278038: A1, В 06 В 1/06.

101. Заявка на изобретение. *Способ и устройство для усиления ультразвуковой волны*, Семченко И. В., Хахомов С. А. № № а 20040700, 22. 07. 2004.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 09.12.04

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ