

К 85-ЛЕТИЮ
Н.И. СИНИЦЫНА

УДК 621.396.677,621.095.1

**ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ
АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА В ДИАПАЗОНЕ 12...18 ГГц
ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

© 2022 г. Б. Д. Зайцев^а, *, А. В. Толстикова^б

^а Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация

^б Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410600 Российская Федерация

*E-mail: zai-boris@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 11.03.2022 г.

Принята к публикации 25.03.2022 г.

Показана возможность возбуждения и регистрации с помощью тонкопленочных преобразователей из нитрида алюминия и окиси цинка продольных и поперечных акустических волн в кристалле алюмоиттриевого граната в диапазоне частот 12...18 ГГц при комнатной температуре. В качестве электродинамической системы использованы одноступенчатый четвертьволновый и двухступенчатый чебышевский согласователи коаксиального типа. Найдено, что коэффициент преобразования при возбуждении продольных и поперечных волн равен ~23 и 30 дБ. Оценено удельное затухание продольных (22.2 дБ/мкс) и поперечных (15.6 дБ/мкс) волн. Показано, что одноступенчатый четвертьволновый и двухступенчатый чебышевский согласователи обеспечили полосу пропускания 11% и 20% соответственно.

DOI: 10.31857/S0033849422100175

ВВЕДЕНИЕ

Определенные успехи в области фундаментальных гиперзвуковых исследований твердого тела, достигнутые к последнему времени, открывают широкие возможности использование гиперзвуковых волн в современной радиотехнике, при создании различных твердотельных устройств СВЧ-диапазона, таких как гиперзвуковые линии задержки, резонаторы, фильтры. В основе работы таких устройств лежит преобразование электромагнитного СВЧ-сигнала в акустическую СВЧ-волну (гиперзвук), которая распространяется в твердотельном звукопроводе и затем обратно трансформируется в задержанный электромагнитный СВЧ-сигнал. Вследствие малой скорости распространения гиперзвуковой волны в звукопроводе (на пять порядков меньше скорости электромагнитной волны) в линии задержки может быть получена задержка СВЧ-сигнала на время, недостижимое в обычных СВЧ-линиях задержки, построенных на отрезках коаксиальных или волноводных линий.

Очевидно, что для успешного возбуждения и детектирования гиперзвуковых колебаний и волн, которые соответствуют СВЧ-диапазону, необходимо чтобы материал звукопровода характеризовался

малыми акустическими потерями, приемлемыми для регистрации задержанного сигнала [1, 2]. Обычно задержка для широко распространенных радиоизмерительных систем, работающих в импульсном режиме, лежит в диапазоне от нескольких десятых долей микросекунды до нескольких десятков микросекунд. Поэтому к указанным материалам относятся кристаллы, имеющие сравнительно небольшую плотность, высокое значение модулей упругости и высокую температуру Дебая [3]. Для снижения удельного затухания гиперзвука, связанного в основном с рассеянием на тепловых колебаниях решетки, возможно использование криогенных температур звукопровода [4, 5].

Очевидно, что звукопровод должен иметь высокую степень однородности. Незначительные неоднородности внутри кристалла могут привести к рассеянию волны и, соответственно, к существенному дополнительному затуханию гиперзвука. Кроме того, эти неоднородности могут стать причиной различного набега фазы на краях гиперзвукового луча, и это также может привести к уменьшению величины задержанного электромагнитного сигнала несмотря на идеальную геометрию образца [3]. Это так называемое “кажущееся затухание”

гиперзвука. Физическая причина та же самая, что и в случае плоских слегка непараллельных торцов образца. Все это связано с малостью длины гиперзвуковой волны. Например, длина волны продольного гиперзвука на частотах ~ 10 и 30 ГГц в рубине равна ~ 1 и 0.3 мкм соответственно.

Гиперзвуковым волнам в отличие от ультразвуковых волн присуще сильное поглощение даже в кристаллах. Поскольку длина волны мала, неоднородности и дефекты звукопровода, размеры которых сравнимы с длиной волны, вызывают значительное рассеяние гиперзвука. Поэтому в качестве объектов для распространения гиперзвуковых волн, как правило, используют искусственные или естественные кристаллы с совершенной структурой и высокой степенью однородности. Поглощение звука имеет место и в идеальном диэлектрическом кристалле, что связано с рассеянием на тепловых колебаниях кристаллической решетки, причем во многих кристаллах характер поглощения одинаков. Для большинства изученных кристаллов температурные зависимости затухания имеют три характерные области. В низкотемпературной области поглощение мало и не зависит от температуры и частоты. Это так называемое остаточное затухание, связанное с рассеянием на статических дефектах кристаллов. Для кристаллов с совершенной структурой указанная область попросту отсутствует. В высокотемпературной области поглощение максимально, оно слабо зависит от температуры и имеет квадратичную зависимость от частоты. Это так называемая область затухания по механизму Ахиезера, в которой имеет место квадратичная частотная зависимость затухания [6]. Между этими областями находится промежуточная температурная область, в которой для затухания характерна сильная температурная зависимость. Низкотемпературная часть этой промежуточной области соответствует механизму затухания Ландау [7]. В этой части затухание пропорционально частоте. В высокотемпературной части промежуточной области, расположенной между областями Ландау и Ахиезера, при повышении температуры частотная зависимость плавно меняется от линейной до квадратичной. Исследования показали, что различные кристаллы отличаются расположением указанных областей на температурных зависимостях затухания. Это отличие связано с температурой Дебая кристалла, причем с ее повышением указанные области сдвигаются в сторону более высоких температур [1–3].

Обзор литературы показал, что возможности кристаллических звукопроводов и систем согласования пьезопреобразователей с волноведущими системами для акустических СВЧ-устройств наиболее детально изучены в диапазоне частот вплоть до ~ 10 ГГц [4, 5, 8–15]. Что касается более высоких частот, то существуют лишь отдельные работы [16–18], не позволяющие составить четкие про-

гнозы относительно создания соответствующих радиокомпонент.

Цель данной статьи – исследовать возможности возбуждения и регистрации акустических волн при комнатной температуре в диапазоне $12\text{...}18$ ГГц.

1. ОПИСАНИЕ ЗВУКОПРОВОДОВ И ПЛЕНОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Обзор литературы показал, что для практического использования в качестве звукопроводов акустических волн в указанном диапазоне наиболее перспективными являются кристаллы алюмоитриевого граната (АИГ) [12, 15] и алюмомагнетитовой шпинели [8–10, 17, 18].

В качестве звукопроводов были использованы кристаллы АИГ, легированного эрбием [12, 15], в виде прямоугольных параллелепипедов сечением 4×4 мм² и длиной от 2.5 до 8 мм. Кристаллографические оси были ориентированы вдоль граней звукопроводов. Для получения образцов с плоскопараллельными торцевыми гранями заготовки клеивали в специальную кассету, и их торцы одновременно шлифовали и полировали вручную на специальных плоских алюминиевых полировальниках. Для получения торцов с 14 классом чистоты на последней операции были использованы смоляные полировальники с алмазным порошком 1.0 и 0.5 мкм. Непараллельность торцов контролировали гониометром Г-5 с точностью 5". В результате разброс непараллельности торцов для полученных звукопроводов составил 5...15".

Затем на отобранные звукопроводы с помощью ионно-плазменного магнетронного метода были нанесены пленки металла (подслоя) и пьезоэлектрика. Такой способ напыления характеризуется высокой скоростью осаждения материала и низким рабочим давлением, что способствует меньшей загрязненности пленок газовыми включениями. Кроме того, из-за наличия скрещенных электрического и магнитного полей ослабляется интенсивная бомбардировка подложки высокоэнергетическими частицами, т.е. устраняется неконтролируемый нагрев подложки и повреждение структуры растущей пленки. Технологическая вакуумная установка имела в своем составе три магнетронных испарителя с разными мишенями диаметром 50 мм, что позволяло производить последовательное напыление металлических и пьезоэлектрических пленок без разгерметизации рабочего объема. Корпус вакуумной камеры охлаждали проточной водой, протекающей через медную трубку, припаянную к его поверхности. Кристаллические звукопроводы закрепляли внутри нагревателя подложек, осуществляющего нагрев кристаллов до нужной температуры, максимальное значение которой составляло 800°C. Температуру нагрева контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Питание магнетронных испарителей осуществлялось от ВЧ-генератора, величину мощности которого можно было регулировать в пределах 0...600 Вт. Между магнетроном и генератором включался блок согласования, автоматически обеспечивавший при изменении режима работы магнетрона минимум отраженной мощности.

Указанные газы подавали в камеру через отдельные игольчатые натекатели, позволявшие регулировать значения парциального давления газов. Затем газы проходили через охлаждаемую жидким азотом ловушку. Полное давление газовой смеси в рабочем объеме подбиралось по возможности минимальным (обеспечивающим устойчивость газового разряда) и составляло $(2...3) \times 10^{-3}$ мм. рт. ст. Процесс напыления контролировали через смотровое окно.

Основные технологические приемы нанесения пленок пьезопреобразователя состояли в следующем. Монокристаллические звукопроводы АИГ предварительно обезжировали в ацетоне при температуре 20°C в течение 20 мин, затем в хромовой смеси (25 г $K_2Cr_2O_7$ на 1 л H_2SO_4) при температуре 60...80°C в течение 10...15 мин. После этого кристаллы медленно охлаждали, промывали в децилированной воде и обрабатывали 15...20 мин ультразвуком с частотой 40 кГц в ацетоне особой чистоты. После загрузки кристаллов вакуумную камеру откачивали до давления $(6...8) \times 10^{-6}$ мм. рт. ст., после чего начиналось обезгаживание подложек, а также вакуумного колпака и азотной ловушки. Вакуумная камера нагревалась излучением от нагревателя подложки, а азотная ловушка от отдельного нагревателя. Обезгаживание продолжалось в течение двух часов, после чего нагрев ловушки отключали. Одновременно включали охлаждение проточной водой наружной поверхности колпака. По окончании процесса охлаждения устанавливали необходимую температуру кристаллов в диапазоне 300...600°C, при этом давление в камере было $(2...3) \times 10^{-6}$ мм. рт. ст. Последним этапом охлаждения являлась заливка жидкого азота в ловушку.

Процесс напыления металла (нижнего электрода пьезоэлемента – подслоя) начинался с установки звукопроводов строго над соответствующим магнетронным испарителем, при этом плоскость мишени была параллельна плоскости торцов звукопроводов. Напыление молибдена для преобразователей из AlN и алюминия для пьезопленок ZnO проводилось в среде аргона при давлении 3×10^{-3} мм. рт. ст. и продолжалось 5...7 мин в зависимости от необходимой толщины пленки (из них около 1 мин на закрытую заслонку). При этом на магнетрон подавалась ВЧ-мощность ~300 Вт. По окончании напыления металла звукопроводы с помощью механизма вращения устанавливали строго над испарителем нитрида алюминия или окиси цинка.

Процесс напыления нитрида алюминия проводили в реактивной среде аргона и азота, а окиси цинка – аргона и кислорода. Натекателями устанавливались необходимые парциальные давления газов. Результирующее давление корректировали с помощью дроссельной заслонки, установленной перед турбомолекулярным насосом.

При напылении пьезопленок AlN была использована мишень из алюминия высокой чистоты, для пленок ZnO – мишень из спрессованного порошка окиси цинка. Для возбуждения сдвиговой акустической волны пьезопленки ZnO напыляли при наклонном положении подложек. Угол между плоскостью мишени и плоскостью торцов звукопроводов составлял 45...60 град. Пленки напыляли при разных соотношениях парциального давления газов, при этом результирующее давление устанавливалось равным 3×10^{-3} мм. рт. ст. Время напыления пленки толщиной около 2500 Å при ВЧ-мощности генератора 400 Вт составляло около 1 ч. При напылении использован двухканальный монитор, позволявший непрерывно контролировать скорость роста пленки и ее толщину.

При необходимости верхний металлический электрод (надслой) напыляли после разгерметизации камеры и установки на кристаллы соответствующей маски. Поверхность пьезоэлектрических пленок получалась зеркально гладкой. Пленки имели высокую механическую прочность и высокое удельное сопротивление.

2. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СОГЛАСУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Электродинамическая система, использовавшаяся для возбуждения акустических волн в кристаллах АИГ на частотах 12...18 ГГц, представляла собой коаксиальную линию с пониженным до величины 0.5 Ом волновым сопротивлением. Эта величина примерно соответствовала модулю импеданса одиночного пьезоэлемента на указанной частоте. Были использованы два варианта возбуждающей системы. Схематически узел возбуждающей узкополосной системы изображен на рис. 1. В этом случае стандартная 50-омная коаксиальная линия 9 согласовывалась с низкоомной линией 6 стандартным образом с помощью четвертьволнового отрезка коаксиальной линии 8 с волновым сопротивлением 5 Ом. Звукопровод 1 с нанесенными на его торец подслоем 2, пьезоэлектриком 3 и надслоем 4 прижимали к торцу низкоомной коаксиальной линии 6. Торец 5 внутреннего проводника и подслоя 2 составляли короткий отрезок радиальной линии с таким же волновым сопротивлением, что и сама коакси-

альная линия. Для этого на торце имелся конус с углом ψ , определяемым формулой [19]

$$\Psi = 2 \arctg \left[\exp \left(-\frac{Z_0}{60} \right) \right], \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии, нагруженной пьезоэлементом. В широкополосном варианте использовался двухступенчатый чебышевский трансформатор [20], который схематично представлен на рис. 2. В этом случае отрезок внутреннего проводника 8 (см. рис. 1) заменялся на двухступенчатый чебышевский переход (ступеньки 10 и 8). Расчет такого перехода проводили по методике, изложенной в [20]. Кристалл с пленочным преобразователем сопрягался с низкоомной частью СВЧ-согласователя точно таким же образом, как и в узкополосном случае.

Следует подчеркнуть, что изображенные системы не содержат никаких реактивных согласующих элементов. В этом случае максимум эффективности преобразования электромагнитной энергии в акустическую получается при условии равенства волнового сопротивления линии Z_0 модулю электрического импеданса пьезоэлемента. Так как в сантиметровом диапазоне модуль импеданса пьезоэлемента обычно мал, то и коаксиальная линия 6 должна была иметь низкое волновое сопротивление. В описываемой конструкции перепад волнового сопротивления составлял величину, равную 100. Это означает, что модуль электрического импеданса пьезоэлемента должен быть равен 0.5 Ом. Эта величина при толщине пленки нитрида алюминия 200 нм обеспечивалась подбором диаметра преобразователя d_1 , который был равен 0.25 мм. Диаметр d_2 коаксиальной линии был равен 2 мм, а толщина подслоя из молибдена 150 нм. Внешний вид коаксиальных электроакустических преобразователей показан на рис. 3.

Кристаллические звуководы прижимали к торцу коаксиальной линии с помощью прижимного устройства, состоящего из внешнего цилиндрического корпуса, внутри которого по скользящей посадке могла перемещаться цанга с внутренним отверстием квадратного сечения, в котором находился кристаллический звуковод. Цанга имела штифт, не позволявший ей поворачиваться вокруг продольной оси устройства. С помощью винтовой крышки цангу вместе со звуководом через упорный шарик и пружину прижимали к торцу коаксиальной линии.

3. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 4 показана структурная схема установки, реализующей эхо-импульсный метод исследования процессов возбуждения и распространения упругих волн в кристаллах в диапазоне 12...18 ГГц.

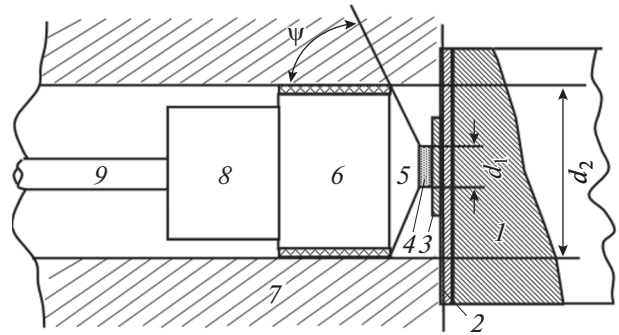


Рис. 1. Электроакустический преобразователь на основе коаксиальной возбуждающей системы: 1 – кристалл, 2 – металлический подслой, 3 – пьезоэлектрический слой, 4 – металлический надслой, 5 – согласующий конус, 6 – центральный проводник конечной низкоомной линии, 7 – внешний проводник коаксиальной линии, 8 – четвертьволновый согласователь, 9 – центральный проводник 50-омной линии.

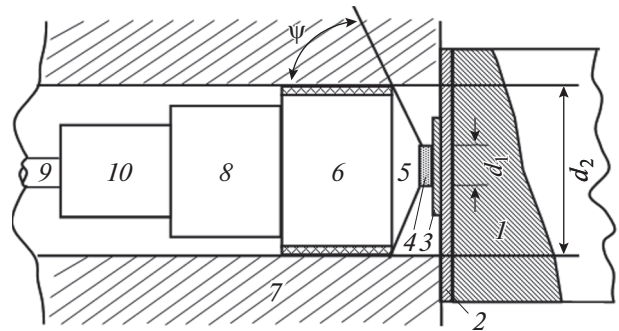


Рис. 2. Электроакустический преобразователь на основе коаксиальной возбуждающей системы: 1 – кристалл, 2 – металлический подслой, 3 – пьезоэлектрический слой, 4 – металлический надслой, 5 – согласующий конус, 6 – центральный проводник конечной низкоомной линии, 7 – внешний проводник коаксиальной линии, 8 и 10 – чебышевский согласователь, 9 – центральный проводник 50-омной линии.



Рис. 3. Коаксиальные электроакустические преобразователи диапазона 12...18 ГГц.

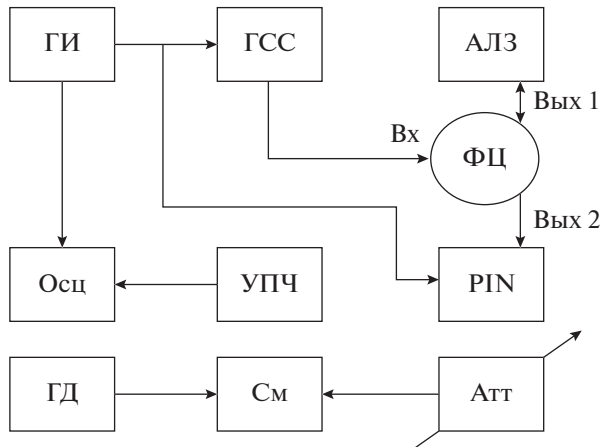


Рис. 4. Блок-схема измерительной установки для исследования процессов возбуждения и приема акустических волн в кристаллах в диапазоне 12...18 ГГц: ГИ – генератор импульсов, ГСС – генератор стандартных сигналов, АЛЗ – исследуемая акустическая линия задержки, ФЦ – ферритовый циркулятор, Осц – осциллограф, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, PIN – импульсный подавитель незадержанного сигнала, ГД – гетеродин, См – смеситель, Атт – аттенюатор.

Источником зондирующего импульса являлся генератор стандартных сигналов (ГСС) типа Г4-11А, который модулировался прямоугольными импульсами длительностью 0,3 мкс, поступавшими от генератора импульсов ГИ типа Г5-54. Радиопульсы мощностью около 10 мВт подавались на Вх ферритового циркулятора ФЦ и далее с Вых 1 на пьезопреобразователь исследуемой акустической линии задержки (АЛЗ). Отраженные зондирующие импульсы и задержанные эхо-импульсы с Вых 2 ФЦ поступали через последовательно включенные аттенюаторы PIN и Атт на вход супергетеродинного приемника. Аттенюатор Атт состоял из двух последовательно включенных поляризационных аттенюаторов типа Д5-35А и предназначался для измерения полных потерь АЛЗ и затухания акустических волн в кристаллах. Приемник состоял из смесителя См, гетеродина ГД, усилителя промежуточной частоты УПЧ и осциллографа Осц. В качестве гетеродина применялся (генератор стандартных сигналов) ГСС типа Г4-11А, работавший в непрерывном режиме. Для обеспечения минимального коэффициента шума приемника использовался волноводный смеситель балансного типа. Транзисторный УПЧ с промежуточной частотой 60 МГц имел полосу пропускания 20 МГц. Чувствительность приемника составляла –120 дБВт. Полные потери определялись как отношение мощности первого эхо-импульса к мощности зондирующего сигнала.

Полные потери задержанного сигнала измерялись следующим образом. Сначала к Вых 1 цир-

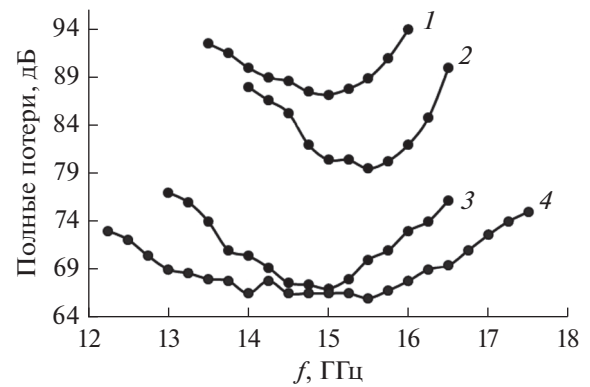


Рис. 5. Частотные зависимости полных потерь различных электроакустических преобразователей: 1 – одноступенчатый преобразователь для возбуждения продольной волны с задержкой 1,8 мкс, 2 – одноступенчатый преобразователь для возбуждения поперечной волны с задержкой 1,1 мкс, 3 – одноступенчатый преобразователь для возбуждения продольной волны с задержкой 0,9 мкс, 4 – двухступенчатый преобразователь для возбуждения продольной волны с задержкой 0,9 мкс.

кулятора подключали исследуемый образец и приемник настраивали на частоту входного сигнала. Затем фиксировалась амплитуда задержанного эхо-импульса и испытуемый прибор отключали от циркулятора. После этого к Вых 1 циркулятора подключали подвижный поршень и с помощью переменных аттенюаторов устанавливали такую же амплитуду зондирующего импульса, как и наблюдавшуюся ранее амплитуду эхо-импульса. С целью исключения ошибки, вызванной неидеальностью циркулятора, эта процедура проводилась для двух положений поршня, соответствовавших максимальному A_{\max} и минимальному A_{\min} значениям введенного ослабления. После этого истинное значение полных потерь находили по формуле [21]

$$A = \left(\frac{\sqrt{A_{\max}} + \sqrt{A_{\min}}}{2} \right)^2. \quad (2)$$

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 представлены частотные зависимости полных потерь нескольких электродинамических систем двухсантиметрового диапазона для возбуждения и приема акустических волн, работающих в режиме “на отражение”. Рассмотрим отдельно параметры этих систем.

1. Электродинамическая система, включающая коаксиальный одноступенчатый согласователь, пленочный преобразователь на основе нитрида алюминия для возбуждения продольной акустической волны и звукопровод из АИГ, легированного эрбием. На рис. 5 представлены частотные зависимости

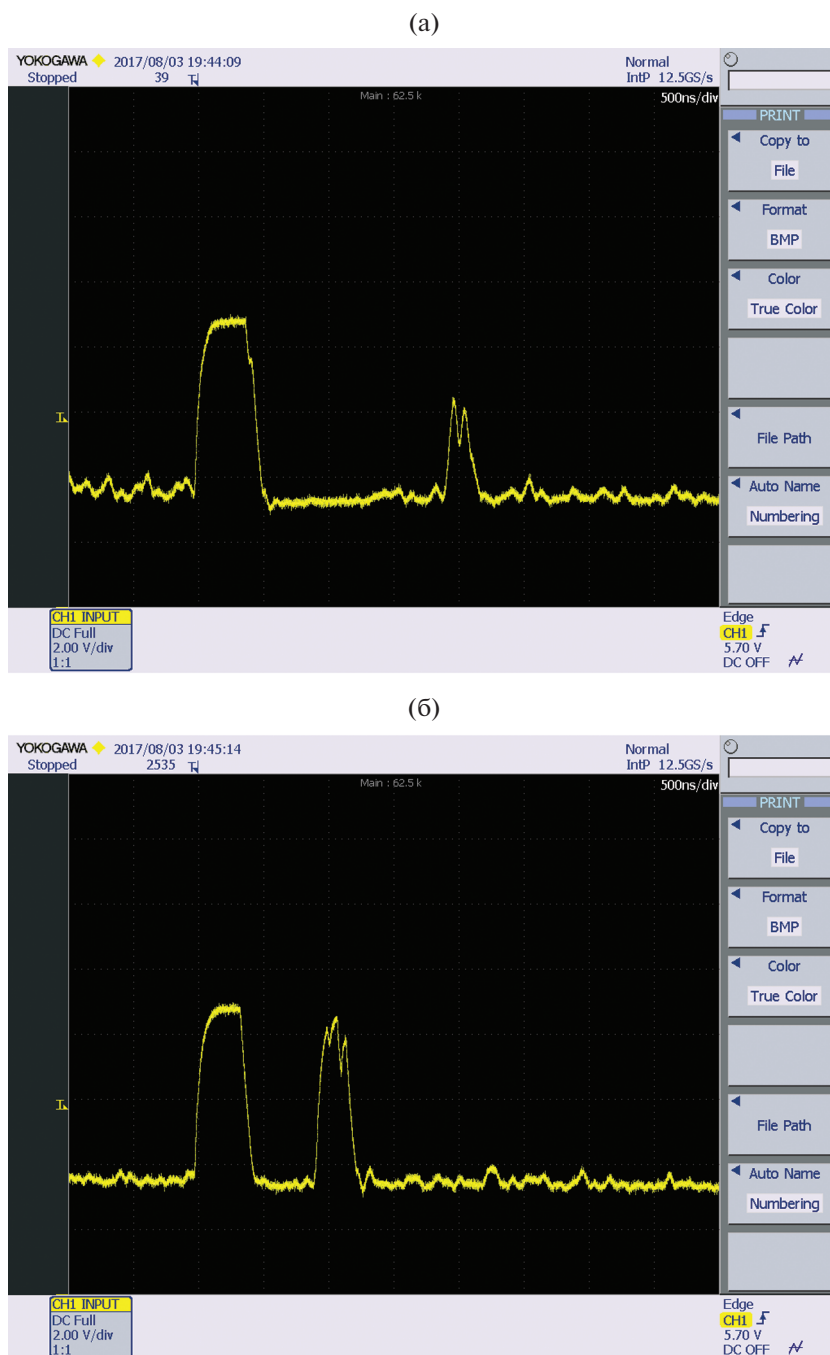


Рис. 6. Осциллограмма задержанного эхо-импульса, соответствующего продольной акустической волне с задержкой 0.9 (а) и 1.8 мкс (б).

полных потерь для звукопроводов длиной 8 и 4 мм (кривые 1 и 3). Соответствующие осциллограммы эхо-импульсов представлены на рис. 6а, 6б. В первом и втором случаях минимальные потери на частоте 15 ГГц составляют 87 и 67 дБ для времен задержки 1.8 и 0.9 мкс. Видно, что в обоих случаях полоса пропускания по уровню 3 дБ составляет ~11%. Разное время задержки позволило оценить затухание акустической волны при времени за-

держки $1.8 - 0.9 = 0.9$ мкс как разность полных потерь $87 - 67 = 20$ дБ. Отсюда, удельное затухание продольной волны на частоте 15 ГГц оказалось равным 22.2 дБ/мкс. Ранее по нескольким эхо-импульсам были определены значения удельного затухания продольных акустических волн в АИГ, легированном эрбием, на частоте 10 ГГц. Это значение оказалось равным 10 дБ/мкс. Исходя из предположения, что с ростом частоты затуха-

ние увеличивается в соответствии со степенным законом из равенства $(22.2/10) = (15/10)^n$, был найден показатель степени $n = 1.97$. Таким образом, с ростом частоты затухание растет по квадратичному закону, что соответствует механизму затухания Ахиезера [6]. Это также подтверждается оценкой времени релаксации тепловых фононов τ , которое определялось из соотношения [22]

$$\chi = \frac{1}{3} C_v V^2 \tau, \quad (3)$$

где χ – коэффициент теплопроводности, C_v – теплоемкость по постоянному объему, V – средняя скорость упругих волн (скорость тепловых фононов). Воспользовавшись известными данными из [23]

$$\begin{aligned} \chi &= 13 \text{ Вт/(м К)}, \\ C_v &= 2.86 \times 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \text{ К)} \text{ и} \\ V &\approx 6.2 \times 10^3 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

было найдено время релаксации тепловых фононов $\tau = 0.35 \times 10^{-12}$ с. Отсюда на частоте $f = 15$ ГГц получаем $2\pi f\tau = 0.033 \ll 1$. Таким образом, диапазон частот 10...15 ГГц соответствует области затухания Ахиезера с квадратичной по частоте зависимостью затухания.

Полные потери включают потери на двойное преобразование и на затухание волны в кристалле. Для кристалла с временем задержки 1.8 мкс полные потери и затухание волны в кристалле составляют 87 и 40 дБ. Следовательно, потери на одно преобразование составляют 23.5 дБ. Для кристалла с временем задержки 0.9 мкс полные потери и затухание волны в кристалле составляют 67 и 20 дБ. Тогда потери на одно преобразование составляют 23.5 дБ, что в точности равно случаю более длинного звукопровода.

2. *Электродинамическая система, включающая коаксиальный двухступенчатый чебышевский согласователь, пленочный преобразователь на основе нитрида алюминия для возбуждения продольной акустической волны и звукопровод из АИГ, легированного эрбием.* На рис. 5 представлена также частотная зависимость полных потерь для звукопровода длиной 4 мм с временем задержки 0.9 мкс (кривая 4). Видно, что минимальные потери на частоте 15.5 ГГц составляют 66 дБ. В этом случае полоса пропускания по уровню 3 дБ составляет ~21%, что в два раза больше по сравнению с одноступенчатым согласователем. Оценив затухание акустической волны в кристалле (20 дБ), находим потери на одно преобразование – 23 дБ. Таким образом, видно, что двухступенчатый согласователь позволяет получить такую же эффективность преобразования, что и одноступенчатый, но в более широкой полосе частот.

3. *Электродинамическая система, включающая коаксиальный одноступенчатый согласователь, пленочный преобразователь на основе окиси цинка для возбуждения поперечной акустической волны и звукопровод из АИГ, легированного эрбием.* На рис. 5 представлена частотная зависимость полных потерь линии задержки со звукопроводом длиной 2.5 мм и с временем задержки 1.1 мкс (кривая 2). Минимальные потери на частоте 15 ГГц и полоса пропускания по уровню 3 дБ составляют 79.5 дБ и ~11% соответственно. Ранее по нескольким эхо-импульсам было определено значение удельного затухания поперечной акустической волны в АИГ, легированном эрбием, на частоте 10 ГГц. Это значение оказались равным 6.5 дБ/мкс. Исходя из квадратичного закона затухания по частоте на частоте 15.5 ГГц удельное затухание равно 15.6 дБ/мкс. Таким образом, затухание в кристалле составляет 17.2 дБ, а потери на одно преобразование равны 31 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность возбуждения и регистрации с помощью тонкопленочных преобразователей из нитрида алюминия и окиси цинка продольных и поперечных акустических волн в кристалле алюмоиттриевого граната в диапазоне частот 12...18 ГГц при комнатной температуре. В качестве электродинамической системы использовались одноступенчатый четвертьволновый и двухступенчатый чебышевский согласователи коаксиального типа. Коэффициент преобразования при возбуждении продольных и поперечных волн оказался равным ~23 и 30 дБ. Оценено удельное затухание продольных (22.2 дБ/мкс) и поперечных (15.6 дБ/мкс) волн. Одноступенчатый четвертьволновый и двухступенчатый чебышевский согласователи обеспечили полосу пропускания 11 и 20% соответственно. В целом показана возможность получения временной задержки ~3 мкс на поперечной акустической волне в кристаллах алюмоиттриевого граната в диапазоне 12...18 ГГц при комнатной температуре.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания № 1021032425796-4-1.3.7; 1.3.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.

2. *Такер Дж., Рэмpton В.* Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975.
3. *Клеменс П.* Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1968. Т. 3. Ч. Б.
4. *Григорьев М.А., Зюрюкин Ю.А., Наянов В.И. и др.* // Электрон. техника. Сер. Контрольно-измерительная аппаратура. 1970. № 1. С. 121.
5. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Пылаева Г.И., Шевчик В.Н.* // ФТТ. 1973. Т. 15. № 5. С. 1398.
6. *Ахиезер А.И.* // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. № 12. С. 1318.
7. *Ландау Л.Д.* Собрание трудов. В 2 тт. М.: Наука, 1969. Т. 1. С. 227.
8. *Lewis M.F., Patterson E.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 7. P. 3420.
9. *Lewis M.F.* // GEC J. Sci. Technol. 1972. V. 39. № 2. P. 91.
10. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Зайцева Н.Г. и др.* // ФТТ. 1976. Т. 18. № 8. С. 2421.
11. *Lewis M.F., Patterson E.* // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. № 10. P. 10.
12. *Ахметов С.Ф., Газизова Г.А., Иванов С.Н.* // ФТТ. 1977. Т. 10. № 1. С. 308.
13. *Леманов В.В., Авдонин В.Я., Петров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. № 11. С. 515.
14. *Балабанов В.Н., Булгаков А.А., Чернец А.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 10. С. 486.
15. *Григорьев М.А., Толстиков А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 4. С. 86.
16. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Пылаева Г.И.* // ФТТ. 1975. Т. 17. № 6. С. 1595.
17. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Пылаева Г.И., Шевчик В.Н.* // ФТТ. 1976. Т. 18. № 8. С. 2307.
18. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Шевчик В.Н.* / ФТТ. 1976. Т. 18. № 2. С. 3708.
19. *Мейнке Х., Гундлах Ф.* Радиотехнический справочник. М.: Сов. радио, 1967. Т. 1.
20. *Фельдштейн А.П., Явич Л.Р., Смирнов В.П.*, Справочник по элементам волноводной техники. М.: Госэнергоиздат, 1960.
21. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Петров В.В., Толстиков А.В.* // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 3. С. 351.
22. *Андреев И.А.* // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена. Естественные и точные науки. 2006. № 3. С. 27.
23. *Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В. и др.* Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982.