

УДК 534:621.382

МАТЕРИАЛЫ ГРУППЫ ЛАНГАСИТА ДЛЯ АКУСТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

О. Л. Балышева,

канд. техн. наук, доцент

В. В. Клудзин,

доктор техн. наук, профессор

С. В. Кулаков,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В. Ф. Дмитриев,

доктор техн. наук, профессор

ОАО «Радар ммс», г. Санкт-Петербург

Обсуждаются проблемы разработки акустоэлектронных устройств для аппаратуры современных информационно-коммуникационных систем. Представлены результаты исследования свойств перспективных акустоэлектронных материалов группы лангасита с помощью акустооптического метода. Измерены упругие и фотоупругие константы и нелинейные параметры кристаллов.

Ключевые слова — акустоэлектронные устройства, поверхностные акустические волны, радиочастотная идентификация, кварцеподобные материалы, лангасит, акустооптический метод.

Введение

Коммуникационные и информационные технологии повсеместно используются в повседневной жизни. К современным информационно-коммуникационным системам предъявляются следующие требования: высокая информационная емкость и быстродействие, надежность, портативность, малое энергопотребление, многофункциональность, удобство использования и др. Всем этим требованиям должна удовлетворять и элементная база этих систем.

В радиоэлектронной аппаратуре информационно-коммуникационных систем широко используются устройства, содержащие акустоэлектронные и акустооптические компоненты. Носителями информации в акустоэлектронных устройствах (АЭУ) являются акустические волны, распространяющиеся в твердых телах. Конструктивно АЭУ представляет собой подложку — среду распространения волн, с нанесенными на ее поверхности преобразователями акустических волн и другими элементами, образующими топологию устройства. В целом, широкий ассорти-

мент АЭУ, широкий круг решаемых ими задач, обширная область применения, а также единые подходы и методы проектирования в сочетании с отработанными технологиями изготовления позволяют говорить об акустоэлектронной элементной базе.

Наибольшее распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и объемных акустических волнах. Преимуществами устройств на ПАВ служат малые габариты, высокая температурная стабильность, малые вносимые потери, высокая надежность и повторяемость характеристик, отсутствие необходимости настройки и регулировки, низкая стоимость в массовом производстве. Одна из причин широкого распространения устройств на ПАВ — это хорошая совместимость с другими устройствами в микроэлектронном интегральном исполнении и огромный потенциал этих устройств в решении задач миниатюризации и функциональной интеграции аппаратуры [1].

В последние два десятилетия среди областей применения АЭУ следует выделить датчики и метки на ПАВ в системах мониторинга и радиоча-

стотной идентификации [2]. Особый интерес представляют пассивные (не требующие источников питания) датчики на ПАВ, использующие беспроводные технологии передачи сигнала. Дальность действия системы датчик — считыватель достигает нескольких десятков метров. Отсутствие внешних соединителей позволяет располагать датчики в труднодоступных местах, на движущихся объектах или объектах, находящихся под высоким напряжением, под воздействием высоких температур, а также на объектах, представляющих радиационную опасность. Важным преимуществом беспроводных датчиков на ПАВ является наличие функции идентификации датчика, что позволяет идентифицировать и сам объект размещения. Измерение какого-либо физического параметра, меняющего скорость ПАВ в подложке, обычно проводится с помощью либо резонаторов на ПАВ, либо линии задержки на ПАВ, подключенных непосредственно к антенне. В настоящее время в различных системах применяются датчики температуры [3–5], механических напряжений [6, 7], давления, крутящего момента и др. Разработаны датчики для измерения нескольких параметров, например, температуры и крутящего момента [8, 9], температуры и давления [10]. Стандартная технология устройств на ПАВ для беспроводных датчиков предполагает использование в качестве материала подложки различных срезов кварца или ниобата лития, на поверхности которых формируются преобразователи и отражательная структура из тонкого слоя алюминия. Подобные устройства работоспособны до температур не выше 250 °С. Вместе с тем возможно увеличить диапазон рабочих температур до 800 °С, если в качестве материала подложки использовать лангасит, а в качестве материала электродов преобразователей и отражательных структур — платину или палладий вместо алюминия [11]. В настоящее время ведутся исследования, направленные на создание целого ряда других типов датчиков на ПАВ. Среди них можно отметить датчики для определения влажности воздуха, датчики газов, жидких веществ и т. д.

Можно выделить три основных направления развития АЭУ: конструктивно-топологическое; технологическое; ресурс «качественной новизны».

В рамках первого направления возможно как совершенствование существующих конструкций (топологий) устройств, так и разработка новых. В последние годы акустоэлектронная элементная база получила развитие благодаря достижениям современной технологии. Это и современные методы изготовления и упаковки, обеспечивающие миниатюризацию и интеграцию устройств, и применение специальных материалов для изготовления электродов, новых способов соединения

конструктивных элементов, обеспечивающих лучшие характеристики, и т. д. К третьему направлению развития можно отнести использование новых материалов, обладающих лучшим набором свойств; применение новых типов подложек, например многослойных, новых типов акустических волн, например высокоскоростных. Возможно применение новых кристаллов или срезов, поддерживающих распространение определенных типов акустических волн с характеристиками, улучшающими технические параметры устройств. Перспективным является использование материалов, в которых возможно распространение нескольких типов акустических волн, что в сочетании со специальными топологиями позволяет создавать на одной подложке многофункциональные устройства.

Кварцеподобные материалы

Специфика АЭУ такова, что улучшение их технических характеристик невозможно без детального изучения свойств материалов, применяемых в качестве подложек, а также характеристик распространяющихся в них акустических волн. Существует ряд параметров, обязательно оцениваемых при проектировании. Для устройств на ПАВ это: скорость распространения волн; коэффициенты электромеханической связи и затухания акустических волн; температурные коэффициенты, параметры, характеризующие дифракцию. Перечень применяемых материалов, типы подложек, требования к ним, а также вопросы влияния параметров материалов подложек на технические характеристики устройств подробно рассмотрены, в частности, в монографии [2].

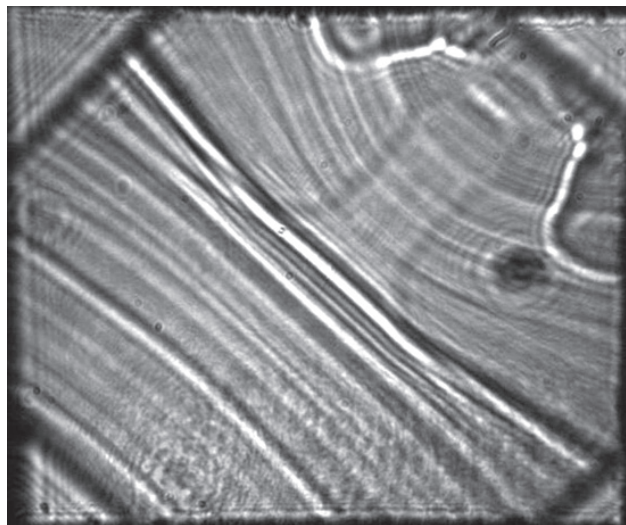
Одним из перспективных направлений современных исследований в области материалов служит синтез и поиск новых монокристаллов или их ориентаций, обладающих лучшим сочетанием свойств. В последние три десятилетия ведется активный поиск новых кристаллических материалов, способных заменить в технике широко используемый монокристаллический кварц. Эти новые кристаллы не должны иметь структурных фазовых переходов в широкой области температур, в них должны отсутствовать двойники и другие дефекты, присущие кварцу. Необходимо также иметь меньший коэффициент поглощения акустических волн, что важно для получения высокой добротности резонаторов, а также больший, чем у кварца, коэффициент электромеханической связи. Основная часть таких материалов, имея ту же кристаллическую симметрию, что и кварц, обладает сложной структурой элементарной ячейки. Среди таких монокристаллов

в последнее время интенсивно исследовался лангасит (LGS — $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{Si}_{14}$). Этот материал имеет большую, чем у кварца, пьезоэлектрическую константу, в нем отсутствуют двойники и фазовые переходы вплоть до температуры плавления. Синтезированные позднее материалы лангаситной группы, такие как лангатат (LGT — $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$), также имеют перспективные характеристики. В частности, в силу малых потерь добротность в резонаторах на основе LGT можно получить, по крайней мере, в 3 раза больше, чем в резонаторах на основе кварца.

Исследования кристаллов семейства лангасита проводятся многими институтами, организациями и научными центрами в России и других странах мира. Институтом кристаллографии РАН (Москва), Московским институтом радиотехники и электроники РАН и Санкт-Петербургским государственным университетом аэрокосмического приборостроения в рамках заключенного контракта по заказу Европейского исследовательского центра армии США были проведены исследования кристаллов семейства лангасита. В ходе исследований были выращены кристаллы семи соединений и проведены комплексные исследования их свойств.

Несмотря на огромное количество научных публикаций, посвященных кристаллам группы лангасита, задача измерения констант (упругих, пьезоэлектрических и др.) остается по-прежнему актуальной. Актуальность и новизна выполненных работ состоит как в полученных в результате измерений константах, так и в использовании уникального акустооптического метода. Проведенная научно-исследовательская работа показала эффективность применения методов акустооптики при исследовании материалов, используемых как для акустоэлектронных, так и для акустооптических устройств.

Акустооптическое взаимодействие в кристаллах является эффективным, надежным и точным инструментом исследования и измерения упругих и оптических характеристик и параметров исследуемых материалов. Специфические свойства многокомпонентных кристаллов семейства лангасита определяют характерные требования к последовательностям процедуры исследований. Уровень дифракционных порядков, регистрируемых в процессе акустооптического взаимодействия, определяет чувствительность и возможности методик измерения. Многокомпонентные кристаллы, как правило, проявляют заметную оптическую неоднородность, что значительно снижает точность и эффективность оптической регистрации. Кристаллы семейства лангасита обладают полосчатой структурой, которая практически не влияет на усредненные макро-



■ **Рис. 1.** Пространственная функция оптической прозрачности образца кристалла LGS (Y[010]-плоскость)

свойства (упругие характеристики, пьезопараметры и т. д.) материала, но может вызывать заметные искажения оптических распределений. Примером оптической неоднородности различных кристаллов служит пространственная функция оптической прозрачности образца (рис. 1).

Эффективность акустооптических измерений зависит от уровня фотоупругих постоянных кристалла, поэтому необходимо знать матрицу этих коэффициентов. Измерение основных компонентов матрицы фотоупругих коэффициентов производилось методом сравнения (методом Диксона) при использовании в качестве эталонного материала плавленого кварца. Результаты измерений компонент фотоупругой матрицы для кристаллов LGS и LGT представлены в табл. 1. В последних столбцах таблицы приведены значения фото-

■ **Таблица 1.** Акустооптические свойства кристаллов LGS и LGT

Тип акустической волны ¹ и направление ее распространения	Фотоупругая постоянная	$M_2 \times 10^{18}, \text{с}^3/\text{г} (p_{mn})$	
		LGS	LGT
L[100]	P_{11}	0,015 (0,019)	0,025 (0,024)
L[100]	P_{12}	0,065 (0,04)	0,04 (0,03)
L[001]	P_{13}	0,12 (0,088)	0,17 (0,078)
L[100]	P_{31}	0,6 (0,12)	0,32 (0,085)
L[001]	P_{33}	0,68 (0,16)	0,84 (0,175)
S[100]	P_{66}	0,06 (0,01)	0,31 (0,02)
S[010]	P_{24}	0,25 (0,03)	0,35 (0,032)

¹ L — продольная волна; S — сдвиговая волна.

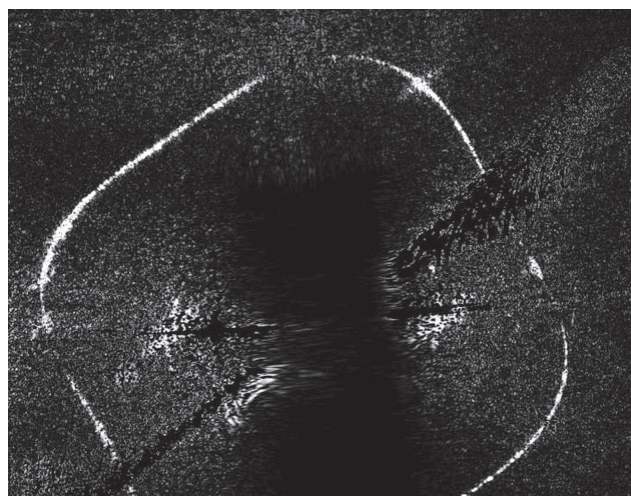
упругих постоянных p_{mn} (в скобках) и значения акустооптических добротностей $M_2 = n^6 p^2 / \rho V^3$ (здесь n — показатель преломления кристалла; ρ , V — плотность материала и скорость распространения акустической волны).

Акустооптический метод позволяет проводить измерения скоростей распространения акустических мод в выбранных направлениях и плоскостях кристалла. Наиболее точный метод измерения скорости акустических мод (импульсно-фазовый) может быть реализован в акустооптическом варианте при выполнении определенных условий. Кроме того, возможна оптическая визуализация угловых распределений обратных скоростей акустических мод для выбранных плоскостей наблюдения, что дает возможность получить полный набор упругих модулей кристалла при использовании минимального количества образцов. На рис. 2 представлен фрагмент картины Шеффера — Бергмана в плоскости (100) кристалла LGS, визуализирующий угловое распределение обратной скорости сдвиговой моды.

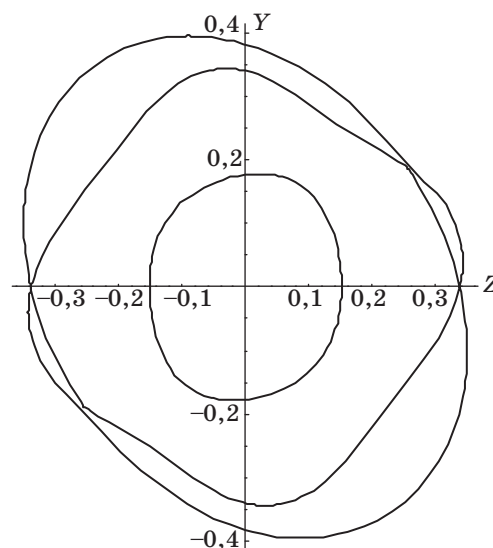
На основании измеренных скоростей акустических волн в выбранных направлениях кристалла рассчитаны компоненты упругих модулей и проведены расчеты угловых распределений акустических скоростей для основных кристаллографических плоскостей. На рис. 3 представлены расчетные данные для плоскости (100) кристалла LGS. Внутренний контур соответствует обратной скорости квазипродольной моды, а внешние контуры задают угловые распределения обратных скоростей двух квазипоперечных мод.

Акустооптический метод является уникально наглядным способом визуализации (получения теневого изображения) структуры акустических полей (метод Schlierens images). В этом случае регистрируются пространственные неоднородности акустических волн, эффекты расходимости и отклонения направления распространения от волновой нормали. Используя свойства упругой анизотропии кристаллов, можно найти направления, в которых акустическая волна будет обладать малой расходимостью (коллимирующие направления). На рис. 4 представлен результат визуализации вырожденной сдвиговой моды в [001] Z-направлении кристалла LGT с углом отклонения направления переноса энергии от волновой нормали 15° .

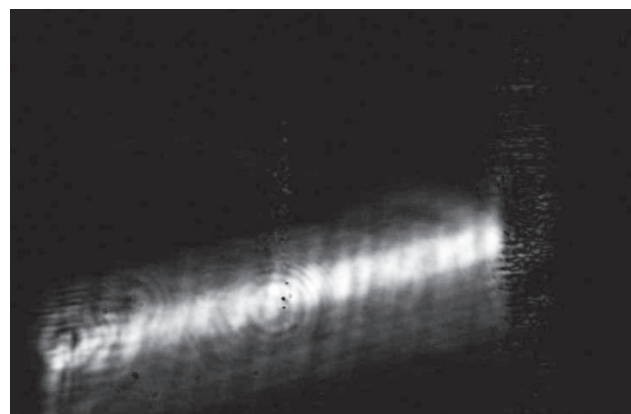
В процессе исследований изучались характеристики и параметры упругой нелинейности кристаллов семейства лангасита. Известно, что наличие упругой нелинейности среды приводит к искажению гармонической формы акустической волны и, соответственно, к генерации высших гармоник, которые могут быть также зарегистрированы с помощью акустооптического ме-



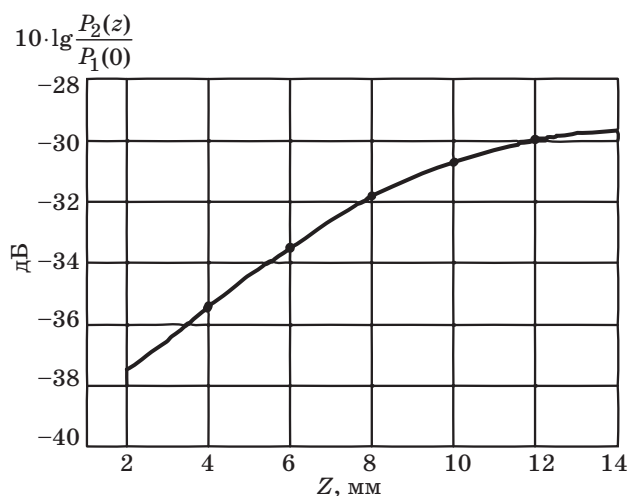
■ Рис. 2. Картина Шеффера — Бергмана для сдвиговой моды в плоскости YZ кристалла LGS



■ Рис. 3. Угловые распределения обратных скоростей акустических мод в плоскости (100) кристалла LGS



■ Рис. 4. Теневое изображение вырожденной сдвиговой моды в направлении оптической оси кристалла LGT



■ **Рис. 5.** Пространственное распределение мощности второй гармоники в кристалле LGT, L[001], $f_1 = 250$ МГц, $P_1(0) = 10$ Вт/см², $|\beta| = 11,5$

года. В этом варианте реализуется сложный, но практически единственный метод измерения динамических констант упругой нелинейности исследуемых материалов. На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования нелинейных эффектов при распространении продольной волны вдоль оптической оси кристалла LGT (β — коэффициент, характеризующий нелинейные упругие свойства материала для конкретных условий измерений). Показана кривая пространственного распределения мощности второй гармоники.

Нелинейные коэффициенты кристаллов и условия их измерения приведены в табл. 2. Погонный коэффициент затухания α здесь определен в форме $\alpha x = \ln(s(x)/s(0))$ (x — координата, отсчитываемая от источника возбуждения акустической волны вдоль направления распространения).

Использование упругой анизотропии кристаллов позволяет заметно повысить параметры АЭУ за счет минимизации энергетической расходимости выбранных акустических мод в особых направлениях в кристалле, называемых «коллимирующими». Для кристаллов LGS и LGT проведены расчеты по поиску таких направлений. Каче-

■ **Таблица 2.** Нелинейные параметры кристаллов

Материал	Акустическая мода и направление	Частота f_1 , МГц	Уровень мощности P , Вт/см ²	Коэффициент затухания α_1 , 1/см	$ \beta $
α SiO ₂	L [001]	450	15	0,09	~ 7
LGS	L [001]	230	12,5	0,04	~ 12,5
LGS	L [010]	220	17	0,02	~ 9,7
LGT	L [001]	250	10	0,06	~ 11,5

ство коллимации в выбранных направлениях проверялось путем расчета профилей распределений мощности акустических волн на разных расстояниях от излучателя. Определены параметры коллимации для разных секущих плоскостей. Используя такие профили, можно оценить потери, вызванные дифракционной расходимостью акустической волны.

Заключение

Проведенные исследования позволяют утверждать, что, несмотря на ряд технических трудностей, акустооптический метод исследования может служить эффективным и наглядным способом измерения характеристик многокомпонентных кристаллов семейства лангасита.

В ходе выполненных исследований получены следующие основные результаты.

1. Впервые определены коэффициенты фотоупругой матрицы кристаллов LGS и LGT. Это дало возможность оптимизировать ориентацию образцов и методику измерений упругих свойств кристаллов.

2. Представлены документальные факты, подтверждающие качественное соответствие расчетных соотношений с экспериментальными значениями измеряемых величин. Этими подтверждениями являются полученные картины Шеффера — Бергмана, определяющие сечения поверхностей обратных скоростей выбранными плоскостями, и теневые картины, определяющие углы отклонения вектора переноса энергии от волновой нормали.

3. Измерены коэффициенты затухания акустических мод различных кристаллов в разных точках частотного диапазона.

4. Представлена методика измерения динамических упругих модулей третьего порядка (нелинейных коэффициентов). Однако возможности акустооптического метода в этом аспекте для некоторых направлений и акустических мод оказываются ограниченными.

5. Приведены теория поиска и расчеты коллимирующих направлений в кристаллах LGS и LGT, которые позволяют реализовать условия распространения акустических волн с минимальной энергетической расходимостью.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы и рекомендации.

Большинство измеряемых параметров имеет значительный разброс значений, причем этот разброс иногда присутствует даже в разных точках одного образца. Это обстоятельство требует состоятельного статистического ряда измерений, который позволит провести достоверные усреднения и выявить тенденции изменения

свойств в зависимости от состава, структуры и технологии синтеза кристаллов. Кроме того, в технических целях к образцам предъявляется комплекс требований, порою противоречивых, что значительно усложняет решение конкретных задач. Увеличение числа химических компонент в составе кристаллов семейства лангасита, с одной стороны, разрешает надеяться на перспективы получения материала с искомыми свойствами (расширенная вариативность), но, с другой стороны, значительно усложняет процесс синтеза.

Результаты выполненных исследований позволяют выработать рекомендации и определить границы применимости материалов в различных устройствах. По-прежнему остаются актуальными исследования, посвященные корреляции химического состава, условий выращивания и свойств кристаллов лангаситной группы в целях управляемого синтеза кристаллов с заданными свойствами. Важное значение имеет исследование долговременной стабильности и повторяемости характеристик устройств на основе многокомпонентных кристаллов.

Литература

1. **Бальшева О. Л.** Фильтры на ПАВ: возможности миниатюризации и функциональной интеграции // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 12. С. 1513–1523.
2. **Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д.** Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / Под ред. акад. РАН Ю. В. Гуляева. — М.: Радиотехника, 2012. — 576 с.
3. **Kuypers J. H., Reindl L. M., Tanaka S., Esashi M.** Maximum Accuracy Evaluation Scheme for Wireless SAW Delay-Line Sensors // IEEE UFFC. 2008. Vol. 55. N 7. P. 1640–1652.
4. **Kuypers J. H. et al.** Passive 2.45 GHz TDMA based Multi-Sensor Wireless Temperature Monitoring System: Results and Design Considerations // Ultrasonics Symp. (IUS 2006). IEEE, 2006. P. 1453–1458.
5. **Дмитриев В. Ф.** Беспроводной датчик температуры на ПАВ с идентификацией // Датчики и системы. 2012. № 1. С. 16–20.
6. **Дмитриев В. Ф.** Беспроводной датчик деформации на поверхностных акустических волнах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2012. Вып. 2. С. 153–162.
7. **Roller M., Malocha D. C., Vaidyanathan R.** SAW OFC Strain Sensor // Ultrasonics Symp. (IUS 2009). IEEE, 2009. P. 2515–2518.
8. **Kalinin V., Bown G., Leigh A.** Contactless Torque and Temperature Sensor Based on SAW Resonators // Ultrasonics Symp. (IUS 2006). IEEE, 2006. P. 1490–1493.
9. **Kalinin V., Lohr R., Leigh A.** Development of a Calibration Procedure for Contactless Torque and Temperature Sensors Based on SAW Resonators // Ultrasonics Symp. (IUS 2008). IEEE, 2008. P. 1865–1868.
10. **Acoustic Wave** / Ed. D. W. Dissanayake. — Sciyo, Croatia, 2010. Ch. 15. P. 341–358.
11. **Thiele A. J., Cunha M. P.** Platinum and Palladium High Temperature Transducers on Langasite // IEEE UFFC. 2005. Vol. 52. N 4. P. 545–548.