

11.1;15

Невзаимное обратное рассеяние волн миллиметрового диапазона кристаллами ниобата лития при возбуждении в них ультразвуковых колебаний

© В.А. Суторихин, Н.Д. Малютин, В.С. Поздняков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
E-mail: ndm@main.tusur.ru

Поступило в Редакцию 24 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 24 июня 2022 г.

Принято к публикации 26 июня 2022 г.

Проведено экспериментальное исследование обратного рассеяния волн миллиметрового диапазона с частотой 33 GHz кристаллами ниобата лития с помощью установки на основе доплеровского радара. Измерения проводились при возбуждении в кристаллах ультразвуковых колебаний с частотой 50.3 kHz и в их отсутствие. Обнаружено, что при упругих ультразвуковых колебаниях в кристаллах наблюдается модуляция фазы волны, отраженной от системы кристалл–диэлектрик–металл, в результате чего возникает эффект невзаимности обратного рассеяния. Детектирование разности фаз напряжения волны обратного рассеяния и напряжения падающей (излучаемой) волны дало уровень полезного сигнала, превышающий уровень шумов приемно-передающего тракта радара на величину до 50 dB. Получаемые результаты полезны для создания имитаторов доплеровского сдвига частоты.

Ключевые слова: невзаимное обратное рассеяние, СВЧ, ниобат лития, ультразвуковые колебания, модуляция фазы.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53200.19034

В последние годы возрос интерес к созданию метасред и их элементов, обладающих невзаимными свойствами [1–3]. В связи с этим ведется поиск новых и совершенствование известных способов управления параметрами элементов, входящих в метасреды, при их использовании в режимах „на просвет“ и „на отражение“ [4–8]. В настоящей работе приведены экспериментальные результаты исследования обратного рассеяния волн миллиметрового СВЧ-диапазона кристаллами ниобата лития, в которых возбуждаются упругие ультразвуковые колебания. Существуют разные подходы к определению невзаимности обратного рассеяния [9]. Один из них состоит в сравнении элементов матрицы обратного рассеяния S_p при смене поляризации излучаемого радиосигнала с горизонтальной (H) на вертикальную (V) [10,11]. Другое определение невзаимности необходимо для пространственно модулируемых систем [12] 4D-типа с возможностью обрабатывать сигналы в пространстве 3D и во времени. Рассматриваемый нами объект также относится к типу 4D. Принимаемые сигналы обратного рассеяния в этом случае можно сравнивать и формировать матрицу рассеяния так же, как это сделано в работах [11,13], но с учетом того, что кристалл подвергается воздействию ультразвука. Предлагается учитывать меняющееся состояние системы и проводить сравнение отраженного сигнала $U_{0XY}(t)$ от объекта, не возбуждаемого ультразвуком, и отраженного сигнала при воздействии на него ультразвука. Здесь X — индекс поляризации $U_{mXY}(t)$ излучаемого электромагнитного поля (ЭМП), Y — индекс параметра,

характеризующего ориентацию исследуемого объекта по отношению к вектору поляризации излучаемого ЭМП. Изменяемым параметром является фазовый сдвиг между напряжениями падающей и отраженной от кристалла волн, определяемый с помощью фазового детектора, а регистрируемым сигналом — напряжение $U_{mXY}(t)$, пропорциональное фазовому сдвигу. При этом может изменяться ориентация кристаллографических осей симметрии кристалла относительно вектора поляризации падающей волны. Запишем матрицу обратного рассеяния S_p :

$$S_p = \begin{bmatrix} U_{0HY1}(t) & U_{0HY2}(t) \\ U_{mHY1}(t) & U_{mHY2}(t) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Входящие в (1) коэффициенты определены выше, индексы $Y1, Y2$ — значения угла поворота кристаллографических осей симметрии кристалла относительно вектора поляризации излучаемого ЭМП.

В примененной установке излучается и принимается сигнал горизонтальной поляризации, но при этом меняет свое положение объект исследований. Изменение положения кристалла и параметров ультразвукового воздействия дает возможность получить семейство матриц обратного рассеяния S_p и качественно исследовать параметры кристаллов. Будем считать обратное рассеяние невзаимным, если в (1) имеют место неравенства $U_{0HY1}(t) \neq U_{mHY1}(t)$ и/или $U_{0HY2}(t) \neq U_{mHY2}(t)$. Коэффициенты матрицы S_p в (1) являются вещественными функциями времени t . Применяя к $U_{0HY1}(t), \dots, U_{mHY2}(t)$ преобразование Фурье, получаем оценку спектральных характеристик матрицы

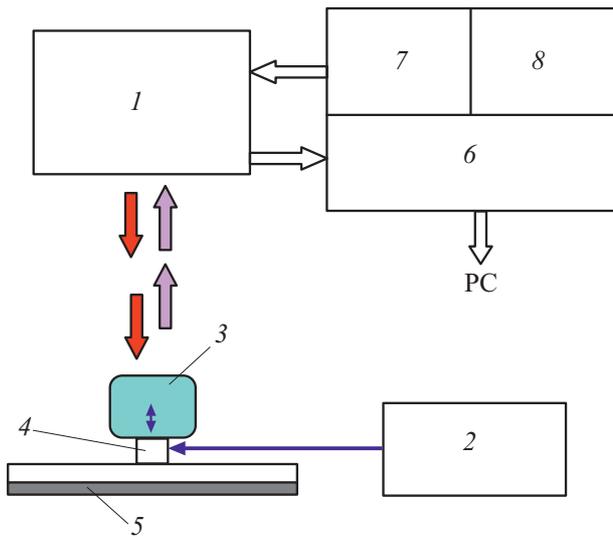


Рис. 1. Установка для исследования обратного рассеяния кристаллов на СВЧ при воздействии на образцы ультразвуковых колебаний. 1 — СВЧ-сенсор (доплеровский радар), 2 — генератор ультразвука 50.3 kHz, 3 — кристалл ниобата лития, 4 — пьезоэлектрический преобразователь МА40Е9-1, 5 — отражающий экран с диэлектрической прокладкой, 6 — усилитель-преобразователь сигнала с выхода фазового детектора СВЧ-сенсора с переносом частоты 50.3 kHz на более низкую частоту (~ 9 kHz) и выходом на ПК, 7 — блок питания СВЧ-сенсора, 8 — индикатор настройки сенсора по максимуму чувствительности сенсора.

обратного рассеяния S_{ps} , в которой наиболее важными являются доплеровские частоты. Техника экспериментального исследования обратного рассеяния для решения схожих с поставленной задачей разрабатывалась ранее [14–17]. В настоящей работе для изучения обратного рассеяния кристаллов СВЧ-волн на частоте 33 GHz при воздействии ультразвука использовалась установка, схема которой показана на рис. 1.

Параметры кристалла вследствие возбуждаемых в них упругих колебаний изменяются с частотой генератора ультразвука 50.3 kHz. Это прежде всего эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} кристалла в направлении падающей электромагнитной волны. Пройдя через кристалл волна отражается от экрана и уже в виде обратной волны вновь проходит через кристалл и принимается СВЧ-сенсором. Изменение ϵ_{eff} для падающей и отраженной волн в кристалле приводит к набегу фазового сдвига волны и доплеровскому смещению частоты, пропорциональным размеру кристалла, зависящим от его ориентации по отношению к фронту электромагнитной волны, а также к вектору поляризации излучаемого ЭМП. Излучаемое электромагнитное поле имеет линейную поляризацию, что проверялось с помощью измерительной антенны. Цель экспериментов состояла в измерении обратного рассеяния СВЧ от кристаллов при возбуждении в них упругих ультразвуковых колебаний. Проведены изме-

рения обратного рассеяния кристаллов, показанных на рис. 2.

Кристалл в виде пластины (показан цифрой 1 на рис. 2) устанавливался на пьезоэлектрический преобразователь 4 (см. рис. 1), закрепленный на диэлектрической прокладке толщиной 5 mm с относительной диэлектрической проницаемостью ~ 1.5 . Кристалл был в двух положениях. В первом он располагался горизонтально и параллельно вектору поляризации излучаемого ЭМП, во втором кристалл ставился вертикально на пьезоэлектрический преобразователь. Генератор ультразвуковой частоты включался при записи принимаемого сигнала три раза с интервалами менее 1 s, время записи 10 s. Зависимость $U(t)$ записывалась с помощью ПК, а затем проводился спектральный анализ с применением стандартных процедур MathCAD.

Сигнал $U(t)$ для горизонтального положения пластины показан на рис. 3, а, для вертикального — на рис. 3, б. Результаты спектрального анализа приведены на рис. 3, в. Видно, что при подаче модулирующего напряжения на пьезоэлектрический преобразователь наблюдается ярко выраженное возрастание $U(t)$ при обоих положениях пластины (рис. 3, а, б). Как и следовало ожидать, модуляция фазы отраженного сигнала при вертикальной установке пластины больше, чем при горизонтальном расположении. Это объясняется разницей путей прохождения через пластину сначала падающей и затем отраженной составляющих волн в зависимости от их положения по отношению к фронту волны. После измерения обратного рассеяния от кристаллов проверялось влияние отражения от поверхности пьезоэлектрического преобразователя. Так же при трехкратной подаче на преобразователь напряжения от генератора ультразвука была записана зависимость $U(t)$. Визуально модуляция $U(t)$ не наблюдалась, что подтвердил спектральный анализ сигнала. В процессе измерений обратного рассеяния выращенного кристалла (показан цифрой 2 на рис. 2) он вращался вокруг вертикальной оси Z так, что кристаллографические оси симметрии

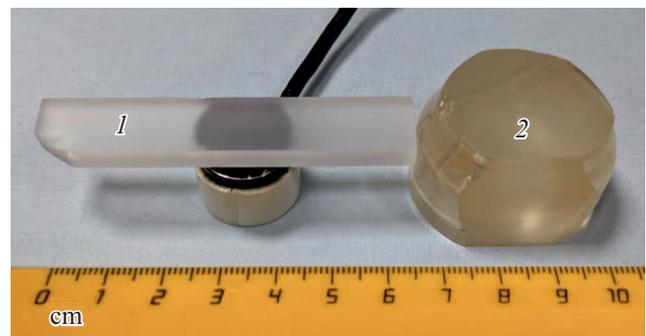


Рис. 2. Кристаллы ниобата лития. 1 — обработанный в виде пластины, 2 — выращенный с наибольшим спилом перпендикулярно оси X . Пьезоэлектрический преобразователь установлен снизу.

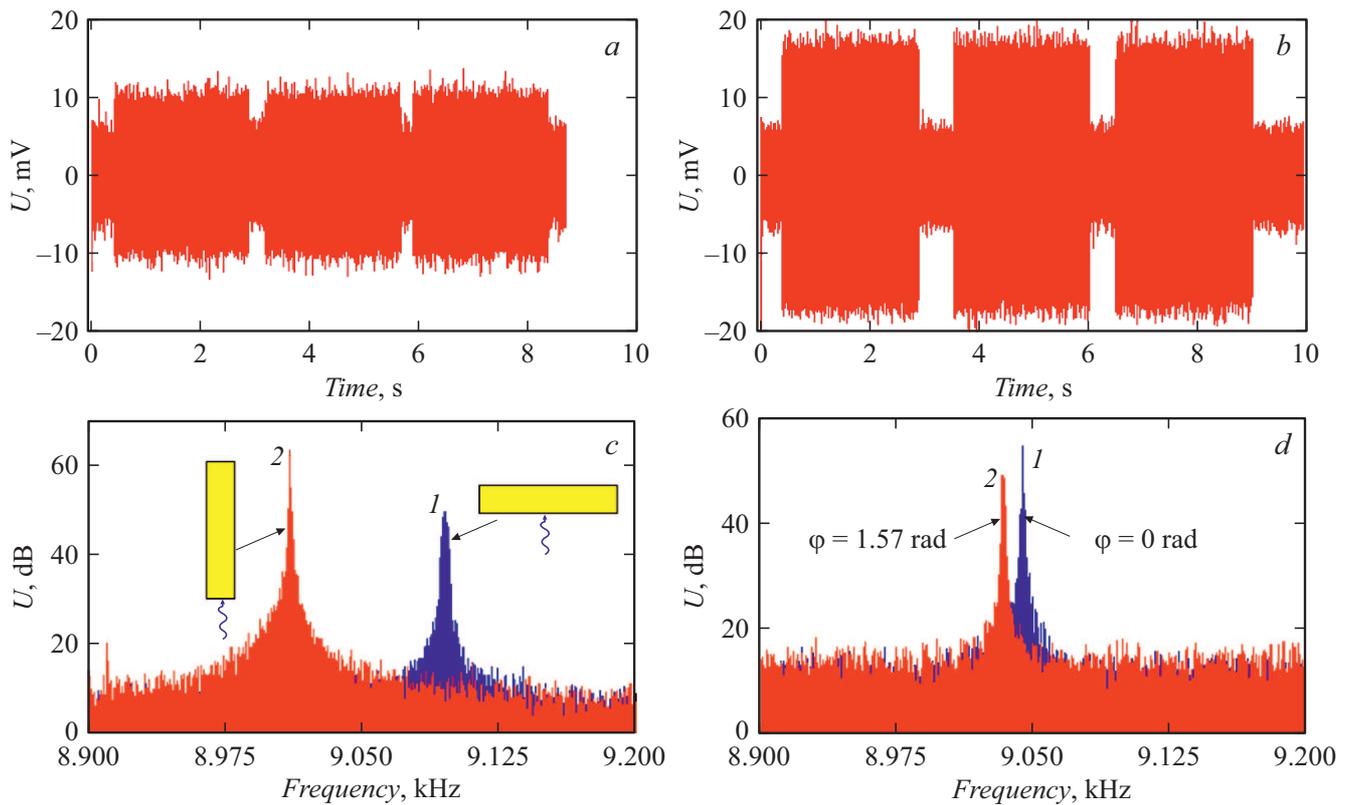


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на выходе усилителя-преобразователя при трехкратном включении ультразвукового генератора для горизонтального (*a*) и вертикального (*b*) положения пластины, спектральные характеристики обратного рассеяния от кристалла ниобата лития в виде пластины (*c*) при горизонтальном (*1*) и вертикальном (*2*) положении пластины относительно фронта падающей волны и спектральная характеристика обратного рассеяния от выращенного кристалла (*d*) при углах поворота осей симметрии $\varphi = 0$ (*1*) и 1.57 rad (*2*).

оказывались под разными углами φ относительно вектора поляризации излучаемого передающей антенной ЭМП. Отсчет велся от среза с наибольшей площадью. Частотная зависимость обратного рассеяния показана на рис. 3, *d*. Измерения проведены при $\varphi = 0$ и 1.57 rad. По данным измерений было записано выражение для матрицы S_{ps}

$$S_{ps} = \begin{bmatrix} U_{0H0}(f) & U_{0H90}(f) \\ U_{mH0}(f) & U_{mH90}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.5888 & 4.6465 \\ 54.684 & 11.482 \end{bmatrix} \Big|_{f=9.0442 \text{ kHz}}. \quad (2)$$

Коэффициенты матрицы (2) обозначены в правой части выражения, они определялись (в dB) на фиксированной частоте 9.0442 kHz. Невзаимность проявляется в неравенстве коэффициентов в столбцах матрицы.

Для характеристики изменения частоты максимума спектральной составляющей при изменении ориентации кристалла по отношению к вектору поляризации излучаемого поля применена запись матрицы S_{ps} в виде

выражения

$$S_{ps} = \begin{bmatrix} \max U_{0H0}(f) & \max U_{0H90}(f) \\ \max U_{mH0}(f) & \max U_{mH90}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.5888 & 0.9096 \\ 54.684 & 48.8430 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В этом варианте записи первый столбец получен на частоте $f = 9.0442$ kHz, второй столбец соответствует частоте $f = 9.0330$ kHz.

Анализ графиков (рис. 3, *d*) показывает зависимость огибающей амплитуд спектральных составляющих обратного рассеяния от угла поворота осей симметрии φ относительно вектора поляризации падающей волны. При этом также происходит изменение ширины полосы частот и смещение центральной частоты.

Таким образом, введено определение матрицы рассеяния для объектов с параметрами, зависящими от времени. Представленная установка и результаты измерения иллюстрируют возможность экспериментального исследования обратного рассеяния волн миллиметрового диапазона от кристалла ниобата лития при возбуждении в нем ультразвуковых колебаний. Показано, что метод измерения, основанный на определении

глубины фазовой модуляции отраженной от системы кристалл–диэлектрик–металл волны при возбуждении упругих колебаний в кристалле, обеспечивает достаточно высокую чувствительность с превышением уровня полезного сигнала над уровнем шумов приемно-передающего тракта СВЧ-сенсора на величину до 50 dB. Экспериментально установлено, что амплитуда и частота максимума огибающей спектральных составляющих обратного рассеяния зависят от угла поворота кристаллографических осей симметрии кристалла относительно поляризации падающей электромагнитной волны миллиметрового диапазона, от ориентации кристалла в пространстве.

Использование разработанной установки и модулей, состоящих из кристаллов ниобата лития и пьезоэлектрических возбудителей упругих колебаний в кристаллах, показывает возможность создания имитаторов доплеровского сдвига частоты.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО „Кристалл-Т“, предоставившим образцы кристаллов, а также А.А. Арутюняну за помощь в проведении обработки данных. Измерения проведены на оборудовании ЦКП „Импульс“ Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Н. Сычев, Н.Д. Малютин, Журнал радиоэлектроники, № 11 (2020). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.11.2
- [2] S. Taravati, A.A. Kishk, IEEE Microwave Mag., **21** (4), 30 (2020). DOI: 10.1109/MMM.2019.2963606
- [3] W.J. Zang, X.T. Wang, A.A. Alvarez-Melcon, J.S. Gomez-Diaz, IEEE Ant. Wireless Prop. Lett., **18** (12), 2661 (2019). DOI: 10.1109/LAWP.2019.2947847
- [4] D. Ramaccia, D.I. Sounas, A. Alu, F. Bilotti, A. Toscano, IEEE Ant. Wireless Prop. Lett., **17** (11), 1968 (2018). DOI: 0.1109/LAWP.2018.2870688
- [5] X. Guo, Y. Ding, Y. Duan., X. Ni, Light Sci. Appl., **8**, 123 (2019). DOI: 10.1038/s41377-019-0225-z
- [6] M.K.T. Al-Nuaimi, W. Hong, A. Mahmoud, in *2017 Sixth Asia-Pacific Conf. on antennas and propagation (APCAP)* (IEEE, 2017), p. 1–3. DOI: 10.1109/APCAP.2017.8420433
- [7] B. Lin, B. Wang, W. Meng, X. Da, W. Li, Y. Fang, Z. Zhu, J. Appl. Phys., **119** (18), 183103 (2016). DOI: 10.1063/1.4948957
- [8] M.I. Khan, Q. Fraz, F.A. Tahir, J. Appl. Phys., **121** (4), 045103 (2017). DOI: 10.1063/1.4974849
- [9] W.M. Boerner, Y. Yamaguchi, IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., **5** (6), 3 (1990). DOI: 10.1109/62.54634
- [10] В.А. Хлусов, Оптика атмосферы и океана, **8** (10), 1441 (1995).
- [11] V.A. Khlusov, P.V. Vorob'ov, J. Electromag. Waves Appl., **35** (13), 1687 (2021). DOI: 10.1080/09205071.2021.1892533
- [12] S. Taravati, G.V. Eleftheriades, arXiv:2011.08423v1 (31 Oct. 2020). <https://arxiv.org/pdf/2011.08423.pdf>
- [13] A.V. Khristenko, V.A. Khlusov, M.V. Osipov, M.E. Rovkin, in *IEEE 22nd Int. Conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM)* (IEEE, 2021), p. 222. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507601
- [14] E.I. Trenkal, V.S. Pozdnyakov, A.G. Loschilov, N.D. Malyutin, in *IEEE 22nd Int. Conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM)* (IEEE, 2021), p. 23. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507673
- [15] В.И. Горбунов, В.А. Суторихин, Техническая акустика, **10**, 16 (2010). <http://www.ejta.org/ru/2010>
- [16] V. Sutorikhin, Appl. Phys. Res., **4** (4), 8 (2012). DOI: 10.5539/apr.v4n4p8
- [17] Е.И. Тренкаль, В.С. Поздняков, А.Г. Лоцилов, Н.Д. Малютин, ПТЭ, № 6, 41 (2021). DOI: 10.31857/S0032816221060069