

Характеристики электромагнитного излучения из образцов кварца, ниобата лития и полиметилметакрилата при их ударном нагружении

А. Д. Костюков⁺, М. А. Карпов^{*1)}

⁺ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053 Севастополь, Россия

^{*} ФГБУН Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 января 2024 г.

После переработки 23 января 2024 г.

Принята к публикации 24 января 2024 г.

Представлены результаты исследования процесса образования трещины в образцах монокристаллического кварца, ниобата лития и полиметилметакрилата, сопровождающегося генерацией электромагнитного излучения при распространении ее вдоль объема образцов. Показана корреляция момента начала механического разрушения образцов с интенсивным излучением широкополосного сверхвысокочастотного излучения из них. Измерены частотные характеристики излучения широкополосной антенной и широкополосным осциллографом. Показана корреляция оптических вспышек с импульсами сверхвысокочастотного излучения. Явление связывается с индуцированной триболюминесценцией. Механизм генерации излучения объясняется появлением в образцах трещин с образованием зарядов на их поверхности и последующей автоэлектронной эмиссией за счет образования высокого градиента электрической напряженности поля.

DOI: 10.31857/S1234567824050124, EDN: JMFWLO

Введение. Явление электротриболюминесценции в диэлектриках и возникновение электрических зарядов на их поверхности, сопровождающее данный эффект, достаточно давно известны [1]. Установлены некоторые зависимости характеристик триболюминесценции от кристаллографической ориентации кристалла [2]. Многие авторы связывают явление свечения при разрушении кристаллов с эмиссией с поверхности диэлектрика свободных электронов высоких энергий вследствие появления на границе разрушения электрических полей высокой напряженности [3]. В [4] было показано, что механоакустические колебания среды могут вызывать в ней генерацию высокочастотного электромагнитного излучения. В настоящей работе нами исследованы характеристики СВЧ излучения, возникающего при ударном воздействии на образцы нескольких типов диэлектриков.

Исследования проводились в вакуумной камере методом механического нагружения образцов ударником, толкаемым детонирующей газовой смесью. Синхронно с ударным нагружением образцов регистрировались: давление в образцах пристыкованным к их поверхности пьезодатчиком, динамика свечения трещин в образцах в оптическом диапазоне методом фотохронографии, а также амплитудно-частотные и временные параметры СВЧ излучения из образцов

широкополосной антенной, подключенной к широкополосному осциллографу.

Исторически сложилось, что первые работы по исследованию свечения кристаллов при их механическом разрушении проводились на монокристаллах кварца.

Монокристалл кварца – классический пьезоэлектрик. Его матрица пьезомодулей имеет пять отличных от нуля компонент: d_{11} , d_{12} , d_{14} , d_{25} и d_{26} . Для них выполняются соотношения: $d_{11} = -d_{12}$, $d_{25} = -d_{14}$, $d_{26} = -2d_{11}$. Поляризация при прямом пьезоэффекте описывается уравнением $P_i = d_{ij}\sigma_j$.

Поляризация сопровождается появлением в объеме монокристалла электрического поля, напряженность которого дается выражением $E = \frac{P_i}{\epsilon\epsilon_0}$ (ϵ и ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная). Так как электронный пробой развивается по направлению поля, то каналы пробоя должны представлять собой некие протяженные дефекты структуры, перпендикулярные плоской поверхности исходного образца.

Анализ публикаций [5–9] показал, что при воздействии ударной волны или волны сжатия пьезоэлектрики излучают электромагнитное излучение (ЭМИ) в разных частотных диапазонах.

В работах [5, 6] в качестве источников излучения оптического диапазона указывают каналы локальных электрических пробоев в объеме монокристалла

¹⁾ e-mail: karpovma@lebedev.ru

кварца, в [7] триболюминесценцию и (или) электрический пробой. В [8] излучение зарегистрировано в опытах без разрушения образца и при отсутствии образования микротрещин. Вопрос о плазменных струях, описанных в [9], требует дополнительных исследований, так как на сегодняшний день отсутствуют гипотезы, объясняющие данное явление.

Кристаллы ниобата лития, используемые нами в экспериментах, имеют тригональную сингонию и относятся к кристаллографической точечной группе $3m$ ($C3v$) (дигригонально-пирамидальная). Его кристаллическая структура не имеет центральной симметрии, поэтому ниобат лития является сегнетоэлектриком и демонстрирует эффект Поккельса, пьезоэлектрический эффект, фотоупругость и нелинейную оптическую поляризуемость.

Полиметилметакрилат (ПММА), также использованный нами в экспериментах, является органической смолой и не является ни пьезоэлектриком, ни сегнетоэлектриком.

Постановка эксперимента. В экспериментах использовались образцы монокристалла кварца, ниобата лития и ПММА в форме параллелепипеда размером $10 \times 10 \times 20$ мм (рис. 1). Удар по поверхности об-

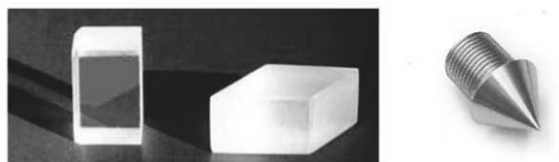


Рис. 1. (Цветной онлайн) Форма исследованных образцов и конический ударник

разцов осуществлялся ударником из тантала конической формы, разогнанным до скорости 300–350 м/с. Ударник толкался детонационной волной, образованной в герметичной камере, наполненной гремучим газом при его поджиге электроразрядом.

С противоположной стороны от удара под образец был подложен электрод, от которого через вакуумный разъем в корпусе ударной трубы были подключены коаксиальные кабели к осциллографу для регистрации образовавшегося на образце электрического заряда. Образец устанавливался в тefлоновый держатель, между держателем и образцом устанавливался датчик давления ПВДФ [10], сигнал с которого выводился через вакуумный разъем на осциллограф. ПВДФ датчик регистрирует динамическое давление с временным разрешением ~ 1 нс.

Регистрация свечения в оптическом диапазоне и процесс образования трещин в образце осуществля-

лась хронографической стрик-камерой через кварцевое окно. СВЧ излучение из образца регистрировалось широкополосной рупорной антенной, подключенной к другому каналу осциллографа (рис. 2).

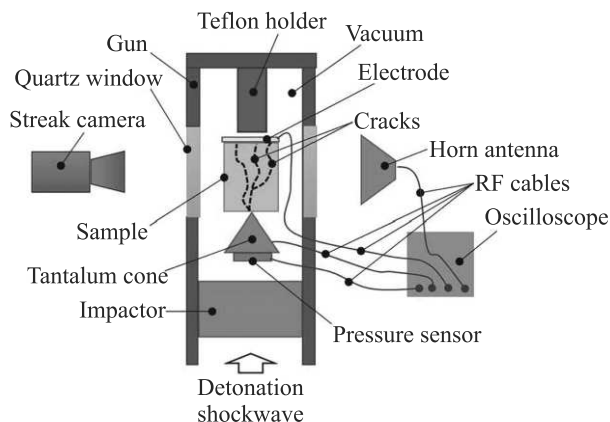


Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема проведения эксперимента

Результаты экспериментов. Давление на поверхности образцов в каждом опыте определялось экспериментально и варьировалось от 0.8 до 1.3 ГПа (рис. 3).

Щель стрик-камеры при съемке была ориентирована вдоль предполагаемого направления развития трещины от ударника. При ударе острия распространение трещин по образцу носит примерно прямолинейный характер, интенсивность свечения в оптическом диапазоне имеет мерцающий характер с периодом единицы-доли нс для всех образцов (рис. 4).

В режиме съемки без щели на фотокатод стрик-камеры удалось зарегистрировать свечение на краях развивающейся трещины (рис. 5).

Регистрация сигнала на проводящих обкладках образцов, сформированных ударником и электродом с противоположной стороны образца и сравнение их с сигналом, получаемым рупорной антенной, показывает высокую степень корреляции между ними, кроме образца из ПММА. (рис. 6–8).

Наложенные осциллограммы с антенны и с обкладок для кварца представлены на рис. 9.

При анализе полученных данных было высказано предположение, что при механическом разрушении твердого тела за счет трибоэлектрического эффекта возникает разность электрических потенциалов на краях трещин, достаточная для появления эмиссии электронов с их поверхности. Под действием электрического поля электроны ускоряются, бомбардируют противоположную поверхность трещины, возникает торможение электронов и эмиссия излуче-

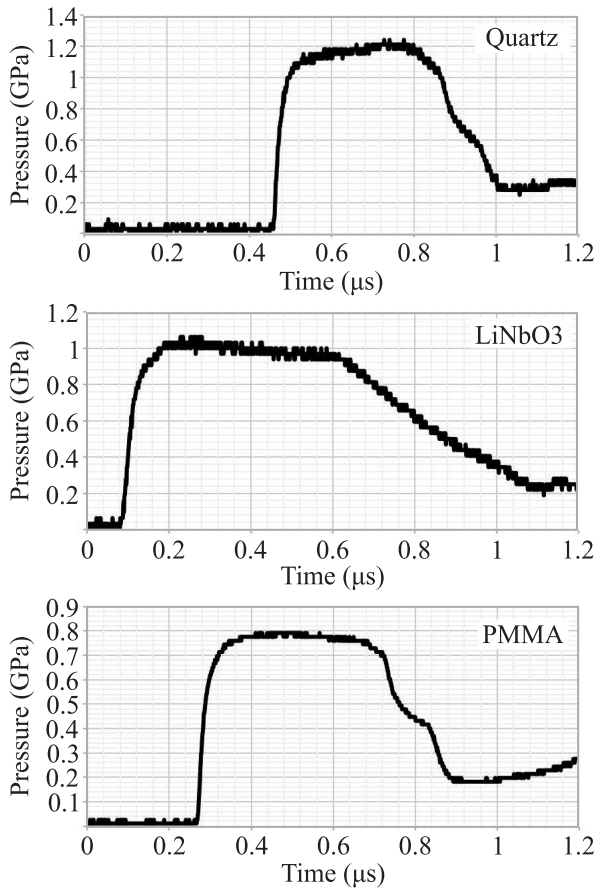


Рис. 3. Профили давлений на плоскости ударника во время нагружения: кварц, ниобат лития, ПММА

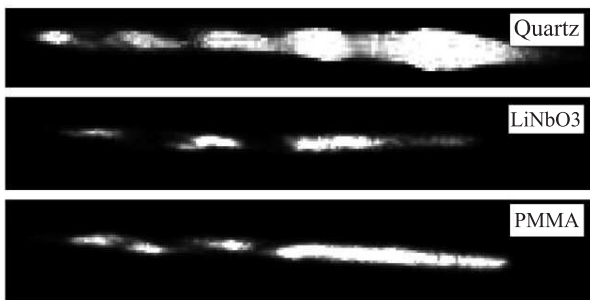


Рис. 4. Хронограмма распространения свечения в трещине: кварц, ниобат лития, ПММА. Ширина щели стрик-камеры 50 мкм, длина развертки 10 нс. Направление развертки: слева направо

ния. По мере прохождения волны разрушения этот эффект многократно повторяется и излучение носит широкополосный и высокочастотный характер.

Обсуждение результатов. Известно, что трещины могут образовываться в изотропной среде только под действием растягивающих напряжений [11]. Однако, при сжатии среды локальные напря-

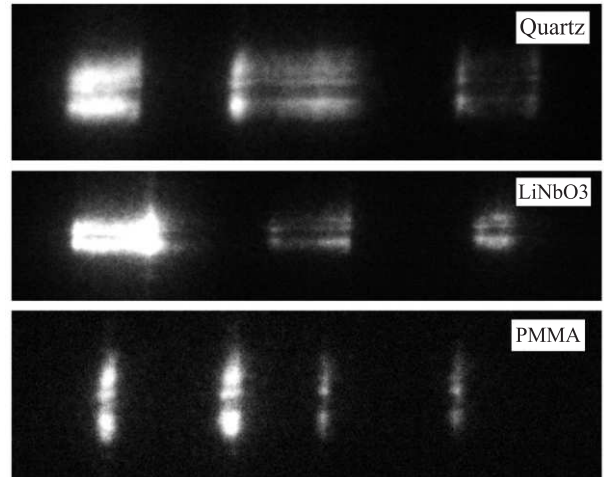


Рис. 5. Хронограмма распространения свечения на краях трещины: кварц, ниобат лития, ПММА. Длина развертки 10 нс. Направление развертки: слева направо

жения вблизи ее неоднородностей, могут стать растягивающими. Если в материале имеются дефекты, вдоль которых облегчены сдвиговые деформации, то при негидростатическом сжатии скольжение материала вдоль границ трещины формирует области избыточного сжатия и растяжения у ее концов. При определенных условиях напряжение оказывается достаточным для инициирования разрушения. Согласно критерию Грффита [12], разрушение материала при сжатии происходит, когда наибольшее локальное растягивающее напряжение достигает порогового значения. Для двухосного напряженного состояния критерий Гриффита имеет вид $2(\sigma_1 - \sigma_2) + 8K(\sigma_1 + \sigma_2) = 0$, где σ_1, σ_2 – главные напряжения, K – константа материала, которая предполагается равной стандартному пределу прочности материала при растяжении.

При одноосном ударном сжатии возрастают как продольная, так и поперечная компоненты напряжений. В упругой области изменение продольного σ_x и поперечного σ_y напряжений происходит согласованным образом: $\sigma_x = \sigma_y(1 - \nu)/\nu$, где ν – коэффициент Пуассона. Порог разрушения быстро возрастает с увеличением поперечного напряжения сжатия и при некотором значении σ_y имеет место так называемый хрупко-пластический переход: сдвиговые напряжения становятся достаточными для возникновения механизмов пластического деформирования, а раскрытие трещин подавляется поперечными напряжениями.

На сегодняшний день не существует единой универсальной теории, объясняющей возникновение электромагнитного излучения (ЭМИ) из подобного

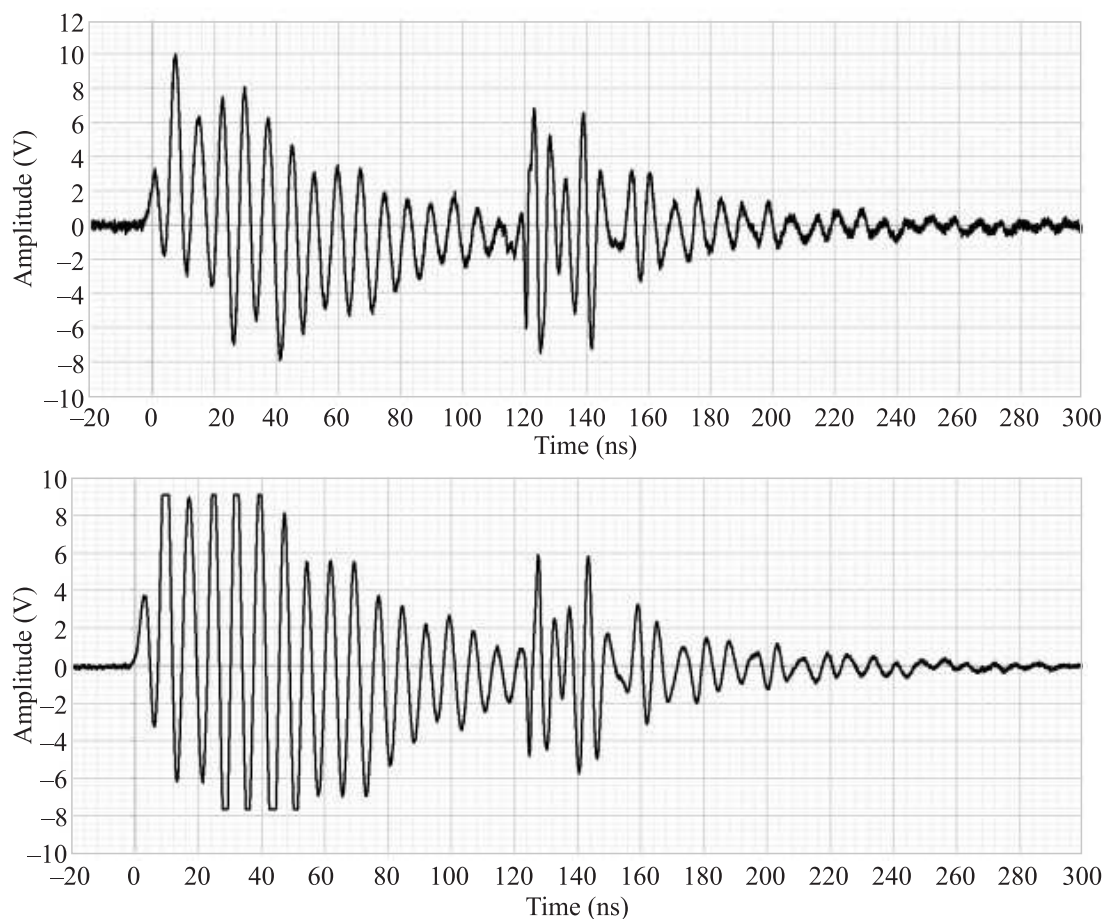


Рис. 6. Сигнал с обкладок (вверху) и сигнал с антенны (внизу) для кварца

рода трещин. Однако, существует несколько полумпирических моделей, позволяющих объяснить механизмы возникновения зарегистрированного нами в экспериментах излучения.

Теория, описанная в [13], говорит, что при распространении трещины электрические заряды на ее границах разделяются по вновь образовавшимся заряженным граням трещины. Причиной такого разделения зарядов называют разрыв химических связей, рассасывание дислокаций и пьезоэлектрические эффекты. Заряд, разделенный вдоль двух границ, приводит к образованию разности потенциалов. Затем заряды рекомбинируют со временем по мере распространения трещины, что соответствует модели линии передачи с рассредоточенным импедансом.

Свойство направленности ЭМИ, обусловленное распространением трещины, может быть объяснено в рамках модели [14]. С использованием предложенной модели трещины, авторами было показано, что во время образования микротрещин электрические потенциалы генерируются перпендикулярно стенкам трещины, магнитная составляющая поля создается

параллельно поверхности трещины, а электромагнитная волна распространяется параллельно направлению распространения трещины.

В модели электрического разряда, возникающего на границах трещины [15] показывается, что при распространении трещины в кристалле происходит стохастическое распределение отрицательных и положительных электрических зарядов по обе стороны границ трещины. Расположение этих электрических зарядов поперек стенок трещины создает электростатическое поле с потенциалом порядка 10^7 В/см. Такой высокий потенциал между границами трещины может привести к электрическому разряду из-за небольшого разделяющего расстояния между границами трещины, а электрический разряд может создавать электромагнитное излучение в том числе и в видимом диапазоне.

Одной из теорий, объясняющих электрический ток, генерируемый в хрупких материалах, является модель движущихся заряженных дислокаций (ДЗД), впервые предложенная в [16]. Согласно этой модели, движение массивов заряженных краевых дис-

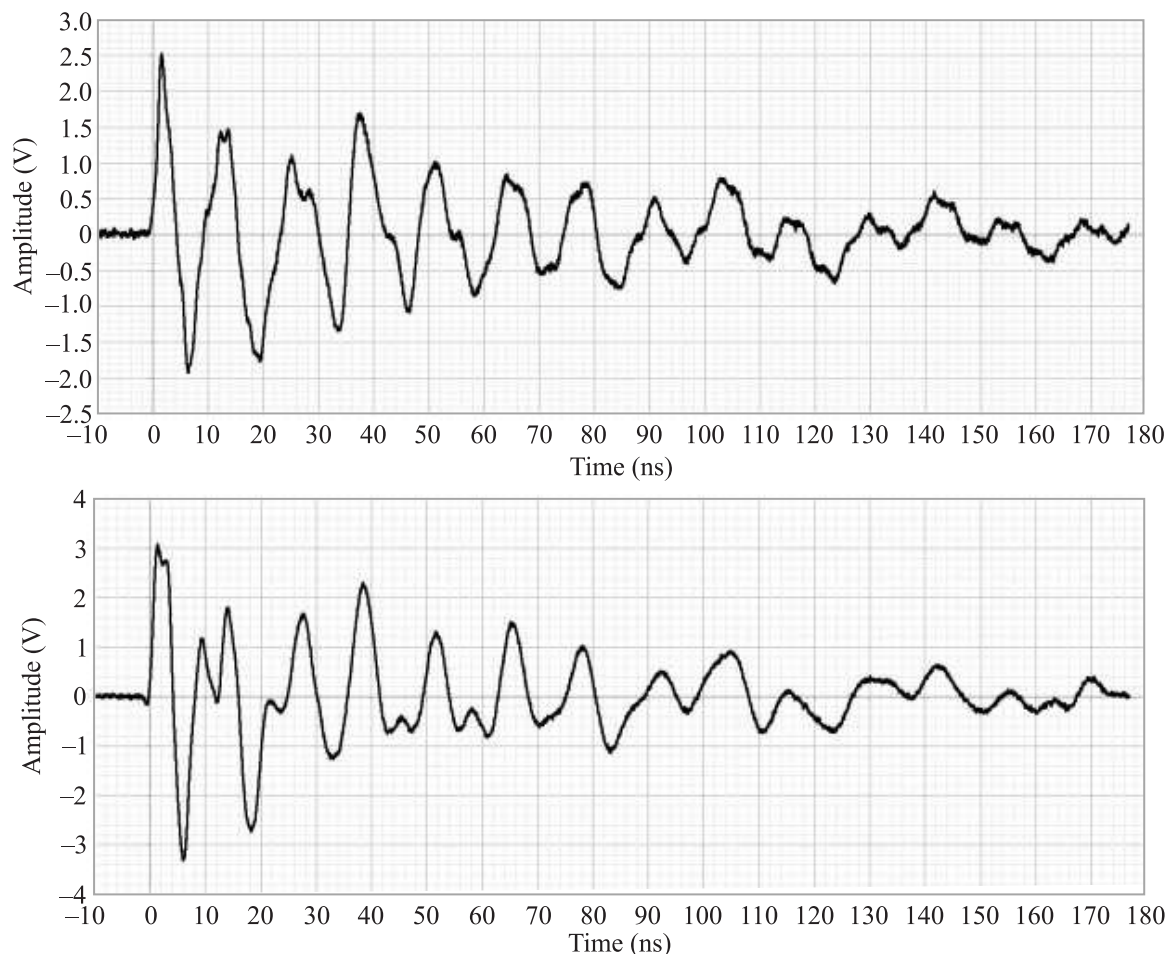


Рис. 7. Сигнал с обкладок (вверху) и сигнал с антенны (внизу) для ниобата лития

локаций при микроразрушении материала приводит к возникновению электрического разряда. Модель ДЗД также объясняет взаимосвязь между плотностью тока и скоростью деформации. Перед разрушением материала напряжения и деформации в нем возрастают, в результате чего начинается микроразрушение с большим количеством распространяющихся вторичных трещин. Эти микротрещины увеличивают количество дислокаций, а также вызывают образование носителей заряда, которые и приводят к возникновению электрического тока. Согласно этой модели, движение дислокаций происходит параллельно приложенному сдвиговому напряжению.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований показывают, что скорость распространения трещин в образцах совпадает со скоростью звука в них при достижении критического давления разрушения, при этом эмиссия оптического излучения из трещин имеет мерцающий во времени, модулированный характер с периодом единицы наносе-

кунд. Синхронно с оптическим излучением из распространяющихся трещин в образцах происходит эмиссия электромагнитного излучения СВЧ диапазона, по частоте и амплитуде совпадающая с оптическим мерцанием. Измеренные в ходе эксперимента электрические заряды, возникающие в образцах при их разрушении, по форме, частоте и амплитуде в целом совпадают с оптическим и радиочастотным сигналами.

Полученные результаты позволяют предположить, что явление свечения при механическом разрушении диэлектрических кристаллов связано с возникновением на откольной границе плотного потока свободных электронов, высокого градиента напряженности электрического поля, а механизм излучения связан с торможением электронов в среде и электрическим пробоем на границах развивающейся трещины. Полученные результаты принципиально согласуются с концепцией, изложенной ранее авторами в [17].

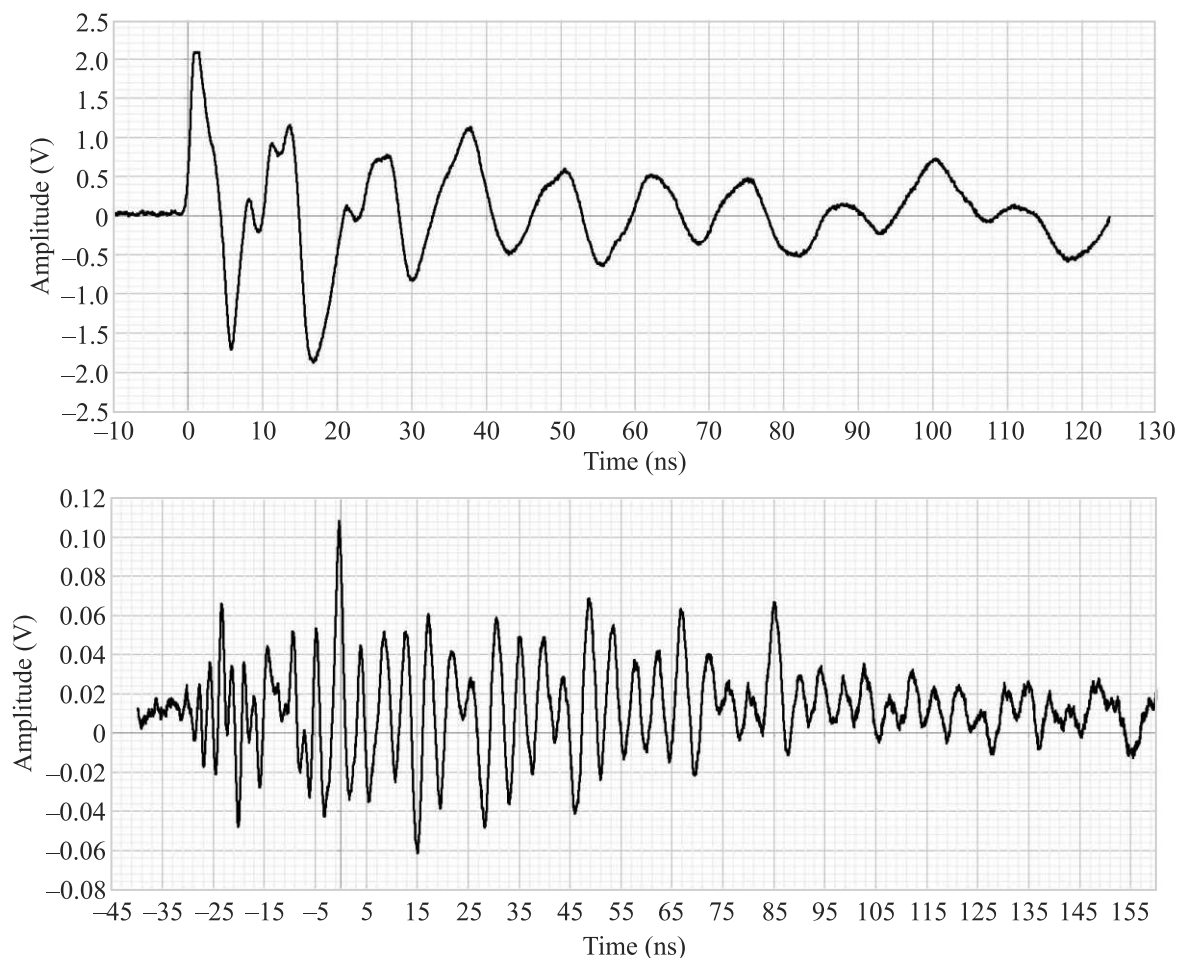


Рис. 8. Сигнал с обкладок (вверху) и сигнал с антенны (внизу) для ПММА

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук”. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

1. С. В. Р. Chandra, J. Phys. D: Appl. Phys. **10**, 1531 (1977); DOI 10.1088/0022-3727/10/11/017.
2. K. Wang, L. Ma, X. Xu, Shizhu Wen, and J. Luo, Sci. Rep. **6**, 26324 (2016); DOI 10.1038/srep26324.
3. D. Olawale, O. I. Okoli, R. Fontenot, and W. Hollerman, *Triboluminescence: Theory, synthesis, and application*, Springer, Switzerland (2016); ISBN 978-3-319-38842-7; DOI 10.1007/978-3-319-38842-7.
4. M. A. Shevchenko, M. A. Karpov, A. D. Kudryavtseva, D. V. Rozinskii, N. V. Tcherniega, and S. F. Umanskaya,

- Sci. Rep. **11**, 7682 (2021); DOI 10.1038/s41598-021-87389-3.
5. W. P. Brooks, J. Appl. Phys. **36**(9), 2788 (1965); DOI 10.1063/1.1714581.
6. R. A. Graham and W. J. Halpin; J. Appl. Phys. **39**(11), 5077 (1968); DOI 10.1063/1.1655926.
7. P. J. Brannon, C. Konrad, R. W. Morris, E. D. Jones, and J. R. Asay, J. Appl. Phys. **54**(11), 6374 (1983); DOI 10.1063/1.331913.
8. В. И. Веттерген, А. В. Воронин, В. С. Куксенко, Р. И. Мамалимов, И. П. Щербаков, ФТТ **56**(2), 315 (2014).
9. Ю. В. Судьенков, ЖТФ **71**(12), 101 (2001).
10. В. А. Борисенок, В. Г. Симакон, В. А. Брагунец, В. Г. Куропаткин, В. А. Кручинин, В. Н. Ромаев, ФГВ **5**, 109 (2003).
11. Г. И. Канель, *Ударные волны в физике твердого тела*, Физматлит, М. (2018), 208 с; ISBN 978-5-9221-1810-1.
12. A. T. Zehnder, *Griffith Theory of Fracture*, in: Q. J. Wang and Y. W. Chung (editors),

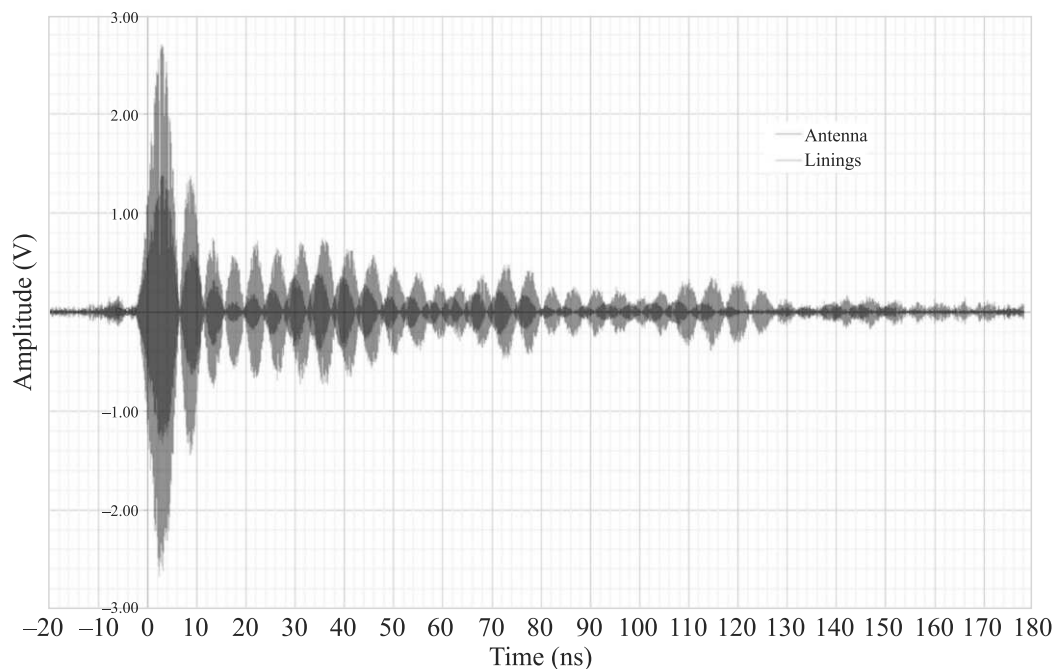


Рис. 9. (Цветной онлайн) Наложенные осциллограммы для кварца с антенны и с обкладок

- Encyclopedia of Tribology*, Springer, Boston, MA; https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_259.
13. S. G. O'Keefe and D. V. Thiel, *Journal of Electrostatics* **36**(3), 225 (1996); [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00046-1).
 14. M. Krumbholz, M. Bock, S. Burchardt, U. Kelka, and A. Vollbrecht, *Solid Earth* **3**, 401 (2012); <https://doi.org/10.5194/se-3-401-2012>, 2012.
 15. В. М. Финкель, Ю. И. Головин, В. Е. Середа, *ФТТ* **17**(3), 770 (1975).
 16. F. Vallianatos and A. Tzanis, *Phys. Chem. Earth.* **23**(9–10), 933 (1998); [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(98\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(98)00122-0).
 17. Р. И. Мамалимов, И. П. Щербаков, Р. К. Мамедов, В. И. Веттегрень, *Известия высших учебных заведений. Приборостроение* **56**(7), 69 (2013).