

DOI: 10.18721/JPM.12409  
УДК 538.956 и 621.317.7

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕТЕЛЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА СОЙЕРА – ТАУЭРА

**А.Ф. Вакуленко<sup>1</sup>, С.Б. Вахрушев<sup>2</sup>, А.В. Филимонов<sup>1</sup> Н. Чжан<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

<sup>3</sup> Сианьский университет Цзяо Тун, г. Сиань, Китайская Народная Республика

В статье рассматривается устройство и практическое применение созданного авторами автоматического измерителя петель сегнетоэлектрического гистерезиса на основе микроконтроллера Atmega328. Проанализированы современные подходы к использованию классической схемы Сойера – Тауэра и показана практическая необходимость в выполненной разработке прибора. Приводится принципиальная схема и описание основных узлов созданного устройства. Представлены результаты тестовых измерений петель гистерезиса в монокристалле титаната бария, которые сравниваются с ранее опубликованными данными. Изложены также результаты измерения петель сегнетоэлектрического гистерезиса в монокристалле твердого раствора  $(\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{0,8}(\text{PbTiO}_3)_{0,2}$  (PMN-PT20) в температурном диапазоне 130 – 300 К.

**Ключевые слова:** поляризация, сегнетоэлектрик, гистерезис, схема Сойера – Тауэра

**Ссылка при цитировании:** Вакуленко А.Ф., Вахрушев С.Б., Филимонов А.В., Чжан Н. Установка для измерения петель сегнетоэлектрического гистерезиса на основе модифицированного метода Сойера – Тауэра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 89–96. DOI: 10.18721/JPM.12409

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## AN AUTOMATIC SYSTEM FOR MEASURING THE FERROELECTRIC HYSTERESIS LOOPS USING THE MODIFIED SAWYER – TOWER CIRCUIT

**A.F. Vakulenko<sup>1</sup>, S.B. Vakhrushev<sup>2</sup>, A.V. Filimonov<sup>1</sup>, N. Zhang<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Xian Jiaotong University, Xian, China

In the article, an equipment and practical application of an automatic system (created by the authors) for measuring the ferroelectric hysteresis loops using the Atmega328 microcontroller have been considered. The modern approaches to the classical Sawyer – Tower circuit's application was analyzed, and practical need for such development was proven. The schematic diagram and description of the main device's components were given. Test results on measuring

the hysteresis loops in a barium titanate single crystal were presented, and they were compared with the data published earlier. Moreover, the results on measuring the ferroelectric hysteresis loops of an [110]-oriented  $0.8\text{Pb}(\text{M}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.2\text{PbTiO}_3$  single crystal in a temperature range of 120–300 K at frequencies from 2 to 50 Hz were presented.

**Keywords:** polarization, ferroelectric, hysteresis, Sawyer – Tower circuit

**Citation:** Vakulenko A.F., Vakhrushev S.B., Filimonov A.V., Zhang N., An automatic system for measuring the ferroelectric hysteresis loops using the modified Sawyer – Tower circuit, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 89–96. DOI: 10.18721/JPM.12409

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Зависимость величины поляризации от внешнего электрического поля в сегнетоэлектриках представляет собой петлю гистерезиса и является одной из основных характеристик сегнетоэлектрических материалов. Первые работы по измерению петель гистерезиса были проведены в 1930-х годах Соьером и Тауэром, и с тех пор метод назван их именами. В первоначальном варианте схема представляла собой генератор высокого напряжения и последовательное присоединение к нему плоского конденсатора образца и опорного конденсатора, подключенных к отклоняющим пластинам трубки Брауна. К настоящему времени данная схема измерений многократно модифицировалась, предложены варианты компенсации паразитных эффектов в образце [1], различные способы измерения выходного сигнала [2], а также специальные формы подаваемого измерительного напряжения [3–5].

В классической схеме применяется синусоидальный или треугольный измерительный сигнал. В этом случае одной из главных проблем при измерении петель гистерезиса является поворот фазы измеряемого сигнала из-за паразитных эффектов в образце, например, из-за высокой величины проводимости. Это выражается в искажении петли или вовсе в появлении петли у материала, у которого ее быть не должно, что подробно описано в работе [6]. Решением проблемы является применение сложной формы измерительного сигнала, например приложение пар импульсов каждой полярности. Этот метод носит название “Positive up negative down” (PUND); также в литературе встречается название “Double wave method” (DWM) [3]. В данном методе переключение поляризации происходит на первых импульсах (полуволнах), а на вторых

измеряются все эффекты, не сохранившиеся при снятии внешнего электрического поля. Встречаются и более сложные измерительные сигналы, но их описание выходит за рамки настоящей работы.

Хотя оригинальная схема измерений, благодаря своей простоте, встречается довольно часто и в настоящее время, она имеет множество недостатков. Самый главный из них – сложность сбора данных. До массового распространения цифровых осциллографов единственным способом сохранения измеренных петель было фотографирование экрана осциллографа или перенос изображения на полупрозрачную бумагу (пленку).

Одним из главных достоинств цифрового осциллографа можно считать возможность сохранения численных данных измеренного сигнала. Такой функцией снабжен каждый современный цифровой осциллограф, но далеко не каждый из них позволяет сохранять числовые значения измерений, проведенных в XY-режиме, который необходим для применения схемы Соьера – Тауэра. В большинстве случаев присутствует возможность сохранять только значения данных обоих каналов осциллографа от времени, что неудобно и требует постоянного переключения между двумя режимами. Также такой метод становится значительно сложнее при использовании специальных форм измерительного сигнала в случае модифицированных схем. Например, в методе двойной волны присутствуют относительно длинные паузы между полуволнами, необходимые для разряда опорного конденсатора, и у осциллографа вполне может не хватить объема памяти для качественного захвата такого долгого процесса измерения.

Также немаловажной проблемой использования осциллографа является необходимость личного присутствия оператора,



поскольку большинство приборов не снабжено автоматической системой сохранения данных синхронно с некоторым внешним процессом. В реальных экспериментах вполне может возникнуть необходимость измерения сотен петель гистерезиса в течение значительного промежутка времени, например, при длительном проходе по температурному диапазону. В таком случае необходимо использовать какую-либо универсальную цифровую систему сбора данных, подобные системы широко распространены в настоящее время.

В данной статье описывается простая в изготовлении система сбора данных на основе широкодоступных, недорогих компонентов и пример ее практического применения — изучение поляризации монокристалла сегнетоэлектрика PMN-20PT.

#### Схема и принцип работы устройства

Предлагаемый измеритель петель сегнетоэлектрического гистерезиса построен на базе микроконтроллера Atmega328, входящего в состав отладочной платы Arduino Uno. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 1. Для измерения петли гистерезиса необходимо иметь как минимум один выходной канал аналогового напряжения и один входной. На представленной схеме выходной канал построен на базе микросхемы ЦАП DAC8512, который имеет встроенный источник опорного напряжения, разрешение 12 бит и выходное напряжение в диапазоне от 0 до 4,095 В. Для расширения диапазона выходных напряжений до  $\pm 10$  В применяется операционный усилитель (ОУ); в данном приборе это четырехканальный ОУ модели LM324. Напряжение питания ОУ, которое составляет  $\pm 12$  В, обеспечивает необходимый размах выходного сигнала. В качестве опорного источника для смещения выходного сигнала при масштабировании диапазонов выбран диодный шунт AD1580 с напряжением стабилизации 1,225 В, током стабилизации от 50 мкА до 10 мА и выходным сопротивлением 0,5 Ом. Подстроечные потенциометры границ диапазона (R7) и нуля (R5) имеют 25 оборотов, что позволяет производить настройку масштабирования выходного напряжения с точностью не хуже 0,5%. Входной канал измеряет падение напряжения на опорном конденсаторе и имеет диапазон  $\pm 5$  В. В качестве АЦП используется встроенный преобразователь

микросхемы Atmega328, имеющий 6 каналов, разрешение 10 бит и опорное напряжение, подаваемое на вход AnalogVref (5 В). Поскольку напряжения на исследуемом образце могут значительно превосходить допустимые входные величины, на входном канале устанавливаются механизмы защиты от пробоя образца (стабилитроны, TVS-диоды и прочее). К сожалению, такое решение имеет свои недостатки, так например, токи утечки стабилитронов, включенных параллельно опорному конденсатору, будут влиять на измерения подобно фазовращающему переменному резистору R13, что не всегда приемлемо. Одним из вариантов более качественной защиты может являться установка высоколинейной опторазвязки, например HCNR201. Блок питания устройства построен на основе микросхем L78L05, L78L06 и MAX680 и обеспечивает напряжения питания +5 и  $\pm 12$  В.

На схеме приведен пример внешних подключений: усилитель напряжения с коэффициентом усиления 100 и установленный образец (плоский конденсатор с исследуемым материалом). В случае, если усилитель напряжения является нелинейным или имеет нестабильные параметры, необходимо также измерять его выходное напряжение. Для этой цели создается еще один аналоговый входной канал (подобный описанному выше), который подключается через делитель к выходу высоковольтного усилителя. В таком случае форма импульсов напряжения выходного канала выбирается исходя из известного поведения усилителя, а значения напряжения на образце и на опорном конденсаторе синхронно измеряются в процессе работы двумя входными каналами.

Величина опорного конденсатора выбирается так, чтобы падение напряжения на нем оставалось в пределах допустимого, но при этом занимало значительную часть диапазона входных напряжений. Для простоты подбора этой величины обычно собирается блок конденсаторов, которые могут подключаться к схеме как ручным галетным переключателем, так и электромагнитными реле, управляемыми микроконтроллером.

Резистор R13 используется для компенсации сдвига фазы между приложенным напряжением и напряжением на опорном конденсаторе, появляющемся в случае значительной проводимости исследуемого образца, а также он может быть ис-

пользован в качестве токоизмерительного сопротивления. В последнем случае опорный конденсатор отключается от цепи, а падение напряжения на резисторе R13 пересчитывается в протекающий через него ток, таким образом можно измерять токовые петли гистерезиса. Величины данного сопротивления обычно составляют единицы-десятки МОм в случае компенсации фазовращения и десятки-сотни кОм в случае измерений тока. В качестве токоизмерительного резистора удобно использовать двоянные потенциометры, в таком случае одну из его половин можно подключить к еще одному каналу АЦП микроконтроллера в режиме делителя опорного напряжения; тогда микроконтроллер может в любой момент измерить значение сопротивления токоизмерительного резистора для мгновенного пересчета напряжения в ток.

Связь микроконтроллера с компьютером можно осуществлять по стандарту RS232, для реализации которого необходимо снабдить схему преобразователем уровней UART-RS232, или же по встроенному в отладочную плату USB-интерфейсу в режиме виртуального COM-порта со скоростью передачи данных до 1 Мбит/с. Программи-

рование микроконтроллера может осуществляться в стандартной среде Arduino IDE, не требующей отдельного программатора, или же в среде AVR Studio с использованием I2C/SPI программатора.

### Экспериментальные исследования

Измерения петель сегнетоэлектрического гистерезиса были проведены на двух образцах: монокристаллах сегнетоэлектриков  $\text{BaTiO}_3$  (ВТО) и  $0,8\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,2\text{PbTiO}_3$  (PMN-20РТ).

Монокристаллы были подготовлены следующим образом: изначально крупные образцы нарезались на пластины с ориентацией плоскости [110] и толщинами 70 мкм для PMN-20РТ и 600 мкм для ВТО, затем поверхности пластин шлифовались алмазной суспензией DiaPro Nap R до уровня шероховатости менее 1 мкм. На обе стороны пластин наносились проводящие электроды «хром-золото» толщиной 84 нм (Cr 4 nm, Au 80 nm); для этой цели применялась вакуумная установка для нанесения тонких пленок Moorfield Minilab 080. Для нарезки применялся станок Struers Accutom 50, для измерения кристаллографической ориентации – рентгеновский дифрактометр

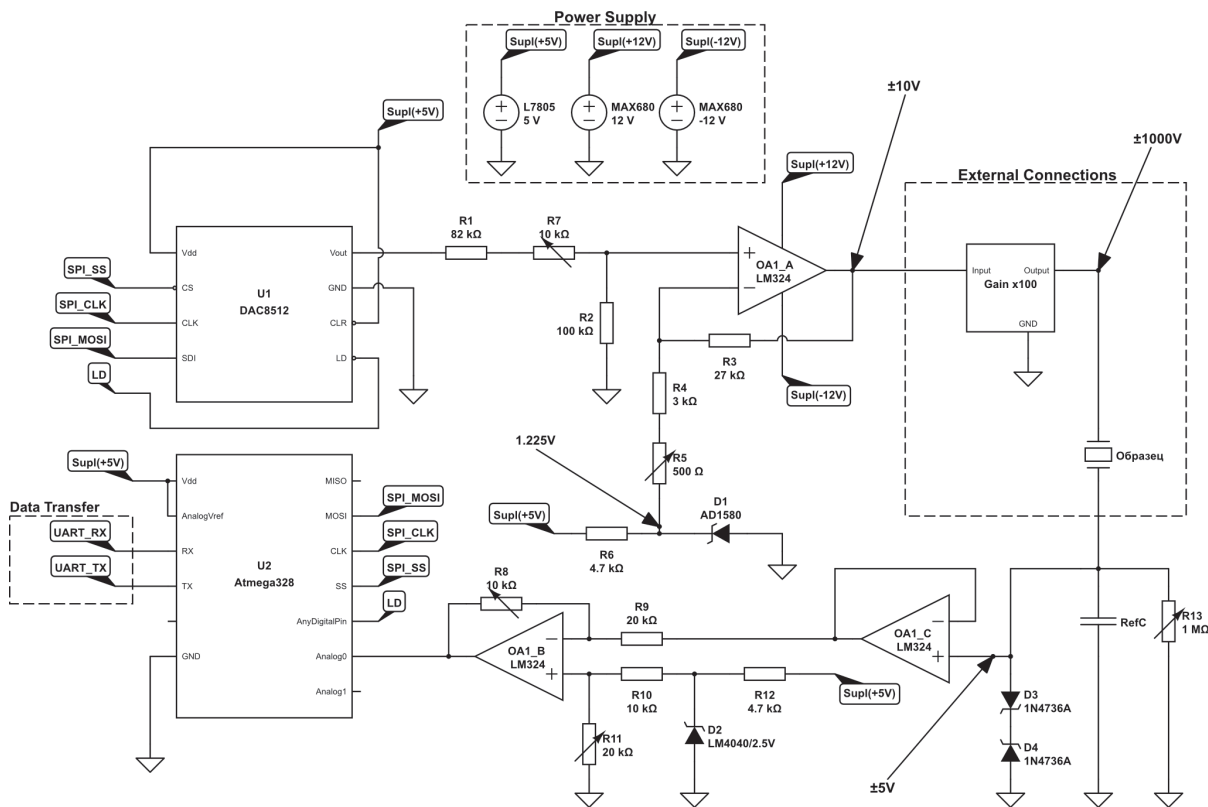


Рис. 1. Принципиальная схема основных узлов измерителя петель сегнетоэлектрического гистерезиса

SuperNova.

Хорошо изученный материал – монокристалл титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) был выбран в качестве тестового образца для проверки и настройки созданного прибора. На рис. 2 представлены полученные петли гистерезиса (темные квадраты) и сигнал вторых полувольт (светлые круги). Значительная разница между сигналами первого и второго прохода указывает на то, что в образце происходит переключение поляризации, которая сохраняется даже при снятии внешнего поля. Положительная и отрицательная части петли смещены относительно друг друга из-за того, что после приложения каждой полувольты измерительного сигнала опорный конденсатор разряжался до нуля. Полученные результаты с хорошей точностью (порядка 10 – 15 %) соответствуют измеренным в работе [7] петлям гистерезиса на том же материале.

В качестве научно-практического применения разработанного прибора далее приводятся результаты по измерению петель гистерезиса в PMN-20PT из нашей работы [8]. Многочисленные исследования процессов переключения поляризации в твердых растворах PMN-PT [9, 10] указывают на линейную зависимость величины коэрцитивного электрического поля от температуры. В работе [11] описывается темпера-

турная модель гистерезиса в сегнетоэлектриках, и представленная там зависимость величины коэрцитивного электрического поля от температуры является нелинейной. Мы предполагаем, что в указанных экспериментальных работах температурный диапазон был недостаточно широк для наблюдения нелинейности.

С помощью разработанного прибора было проведено измерение петель сегнетоэлектрического гистерезиса в температурном диапазоне от 130 К до 300 К. На рис. 3, *a* представлены квазистатические (измеренные на частоте 2 Гц) сегнетоэлектрические петли гистерезиса при различных температурах. Для повышения точности измерений применялся метод двойной волны (DWM). На рис. 3, *b* представлены полученные результаты для первых (темные точки) и вторых (светлые точки) полувольт. Значительная разница между сигналами первого и второго прохода означает, что «ступеньки» измеренных петель гистерезиса вызваны переключением поляризации, паразитные эффекты малы и их можно не учитывать. Значения коэрцитивных электрических полей были получены с использованием измеренных петель гистерезиса (рис. 3, *c*).

Полученные нами зависимости коэрцитивных электрических полей от температуры нелинейны, что соответствует модели

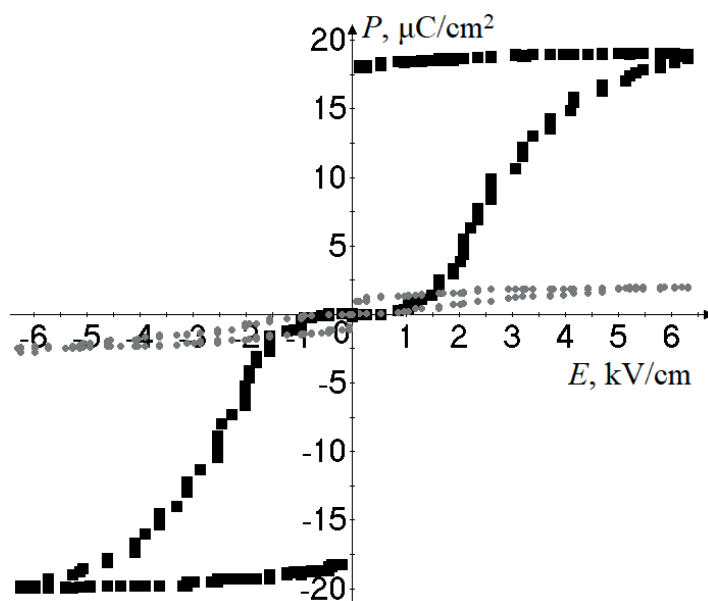


Рис. 2. Петля гистерезиса, полученная методом двойной волны на монокристалле  $\text{BaTiO}_3$ ; использован созданный измеритель.

Амплитуда и частота измерительного сигнала равны 400 В и 50 Гц соответственно; темные квадраты – сигнал первых полувольт, светлые круги – сигнал вторых полувольт



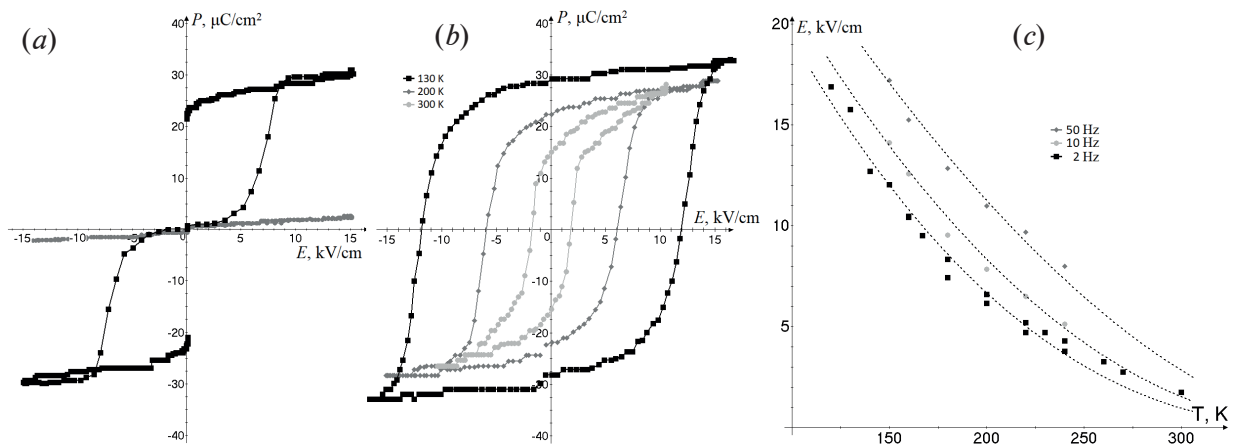


Рис. 3. Петля гистерезиса, полученная методом двойной волны в монокристалле PMN-20РТ (a); петли гистерезиса, измеренные классическим способом при различных температурах (b). Зависимости коэрцитивных полей от температуры при различных измерительных частотах (c).

На рис. 3,а темные точки – сигналы первых полуволн, светлые – сигналы вторых полуволн

сегнетоэлектрического гистерезиса, описанной в работе [11]. Согласно указанной модели, величина коэрцитивного электрического поля  $E_c$  выражается как

$$E_c = E_h \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^p, \quad (1)$$

где  $E_h$  – поле смещения [12],  $T_c$  – температура Кюри,  $p$  – безразмерная константа.

С использованием выражения (1) был проведен регрессионный анализ полученных зависимостей. Коэффициенты, входящие в это выражение, были следующими (определены методом наименьших квадратов):

$$\begin{aligned} E_h &= 40,1 \text{ кВ/см}; T_c = 380 \text{ К}; \\ p &= 2,4 \text{ при } 2 \text{ Гц}; p = 2,1 \text{ при } 10 \text{ Гц}; \\ p &= 1,7 \text{ при } 50 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Оценку и сравнение полученных коэффициентов провести затруднительно, так как на данный момент наша экспериментальная работа, которая проведена на монокристалле PMN-20РТ с применением

вышеуказанной модели, является пионерской.

### Заключение

В настоящей работе был разработан и создан простой и эффективный измеритель петель сегнетоэлектрического гистерезиса, реализующий как классическую схему Соьера – Тауэра, так и модифицированный метод «двойной волны». Представлена принципиальная схема основных узлов данного измерителя. Прибор протестирован на монокристалле титаната бария и показал хорошую точность измерений. Продемонстрировано практическое применение созданного измерителя в реальной научной задаче: получены петли гистерезиса и значения величин коэрцитивных полей монокристалла PMN-20РТ в температурном диапазоне 130 – 300 К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта №19-52-53026.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hikam M., Rachmat A., Ode L., Bambang S., Arief S. The electrical hysteresis loop and polarization value of  $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$  multilayer films material at different annealing temperature ( $x = 0.1$  and  $0.08$ ) based on Sawyer – Tower circuit // Proceedings of the 2014 International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA-14). Atlantis Press, 2014. Pp. 41–48.
2. Печерская Е.А. Применение метода Соьера – Тауэра и его модификаций для измерения электрических параметров сегнетоэлектриков // Измерительная техника. 2007. № 10. С. 54–58.
3. Fukunaga M., Noda Y. New technique for measuring ferroelectric and antiferroelectric hysteresis loops // Journal of the Physical Society



of Japan. 2008. Vol. 77. No. 6. P. 064706.

4. Fina I., Fabrega L., Langenberg E., Marti X., Sanchez F., Varela M., Fontcuberta J. Nonferroelectric contributions to the hysteresis cycles in manganite thin films: A comparative study of measurement techniques //Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109. No. 7. P. 074105.

5. Liu J., Zhao Y., Chen C., Wei X., Zhang Z. Study on the polarization and relaxation processes of ferroelectric polymer films using the Sawyer–Tower circuit with square voltage waveform //The Journal of Physical Chemistry. C. 2017. Vol. 121. No. 23. Pp. 12531–12539.

6. Tylczynski Z. A collection of 505 papers on false or unconfirmed ferroelectric properties in single crystals, ceramics and polymers //Frontiers of Physics. 2019. Vol. 14. No. 6. P. 63301.

7. Wongdamnern N., Ngamjarurojana A., Laosiritaworn Y., Ananta S., Yimnirun R. Dynamic ferroelectric hysteresis scaling of BaTiO<sub>3</sub> single crystals // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. No. 4. P. 044109.

8. Vakulenko A.F., Vakhrushev S.B., Filimonov

A.V. Investigation of polarization switching processes in 0.8PMN–0.2PT single crystal in a temperature range from 100 K to 300 K // Ferroelectrics. 2019. Vol. 542. No. 1. Pp. 77–84.

9. Zhang Y., Chen Z., Cao W., Zhang Z. Temperature and frequency dependence of the coercive field of 0.71PbMn<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>–0.29PbTiO<sub>3</sub> relaxor-based ferroelectric single crystal //Applied Physics Letters. 2017. Vol. 111. No. 17. P. 172902.

10. Chen I.W., Wang Y. A domain wall model for relaxor ferroelectrics //Ferroelectrics. 1998. Vol. 206. No. 1. Pp. 245–263.

11. Raye J.K., Smith R.C. A temperature-dependent hysteresis model for relaxor ferroelectric compounds //Smart Structures and Materials 2004: Modeling, Signal Processing, and Control. International Society for Optics and Photonics. 2004. Vol. 5383. Pp. 1–10.

12. Smith R.C., Seelecke S., Ounaies Z., Smith J. A free energy model for hysteresis in ferroelectric materials // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2003. Vol. 14. No. 11. Pp. 719–739.

*Статья поступила в редакцию 25.10.2019, принята к публикации 05.11.2019.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАКУЛЕНКО Александр Феликсович** – инженер научно-образовательного центра «Физика нанокompозитных материалов электронной техники» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
sasha705@mail.ru

**ВАХРУШЕВ Сергей Борисович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
s.vakhrushev@mail.ioffe.ru

**ФИЛИМОНОВ Алексей Владимирович** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы, директор научно-образовательного центра «Физика нанокompозитных материалов электронной техники» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
filimonov@rphf.spbstu.ru

**ЧЖАН Нан** – научный сотрудник Сианьского университета Цзяо Тун, г. Сиань, Китайская Народная Республика.

28 Xianning W Rd, Jiaoda Commerce Block, Beilin, Xi'an, Shaanxi, China  
ic@mail.xjtu.edu.cn

#### REFERENCES

1. Hikam M., Rachmat A., Ode L., et al., The electrical hysteresis loop and polarization value of BaZr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> multilayer films material at different annealing temperature ( $x = 0.1$ )

and 0.08) based on Sawyer – Tower circuit, Proceedings of the 2014 International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA-14), Atlantis Press (2014) 41–48.

2. **Pecherskaya E.A.**, Primeneniye metoda Soyera–Tauera i yego modifikatsiy dlya izmereniya elektricheskikh parametrov segnetoelektrikov [Applying the Sawyer – Tower technique and its modification for measuring the electric parameters of ferroelectrics], Izmeritelnaya Tekhnika (Measuring Technique). (10) (2007) 54–58.

3. **Fukunaga M., Noda Y.**, New technique for measuring ferroelectric and antiferroelectric hysteresis loops, Journal of the Physical Society of Japan. 77 (6) (2008) 064706.

4. **Fina I., Fabrega L., Langenberg E., et al.**, Nonferroelectric contributions to the hysteresis cycles in manganite thin films: A comparative study of measurement techniques, Journal of Applied Physics. 109 (7) (2011) 074105.

5. **Liu J., Zhao Y., Chen C., et al.**, Study on the polarization and relaxation processes of ferroelectric polymer films using the Sawyer – Tower circuit with square voltage waveform, The Journal of Physical Chemistry, C. 121 (23) (2017) 12531–12539.

6. **Tylczynski Z.**, A collection of 505 papers on false or unconfirmed ferroelectric properties in single crystals, ceramics and polymers, Frontiers

of Physics. 14 (6) (2019) 63301.

7. **Wongdamnern N., Ngamjarurojana A., Laosiritaworn Y., et al.**, Dynamic ferroelectric hysteresis scaling of BaTiO<sub>3</sub> single crystals, Journal of Applied Physics. 105 (4) (2009) 044109.

8. **Vakulenko A.F., Vakhrushev S.B., Filimonov A.V.**, Investigation of polarization switching processes in 0.8PMN-0.2PT single crystal in a temperature range from 100 K to 300 K, Ferroelectrics. 542 (1) (2019) 77–84.

9. **Zhang Y., Chen Z., Cao W., Zhang Z.**, Temperature and frequency dependence of the coercive field of 0.71PbMn<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>-0.29PbTiO<sub>3</sub> relaxor-based ferroelectric single crystal, Applied Physics Letters. 111 (17) (2017) 172902.

10. **Chen I.W., Wang Y.**, A domain wall model for relaxor ferroelectrics, Ferroelectrics. 206 (1) (1998) 245–263.

11. **Raye J.K., Smith R.C.**, A temperature-dependent hysteresis model for relaxor ferroelectric compounds, “Smart Structures and Materials 2004: Modeling, Signal Processing, and Control” (International Society for Optics and Photonics), 5383 (2004) 1–10.

12. **Smith R.C., Seelecke S., Ounaies Z., Smith J.**, A free energy model for hysteresis in ferroelectric materials, Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 14 (11) (2003) 719–739.

*Received 25.10.2019, accepted 05.11.2019.*

## THE AUTHORS

### **VAKULENKO Aleksandr F.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
vakulenko705@gmail.com

### **VAKHRUSHEV Sergey B.**

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
s.vakhrushev@mail.ioffe.ru

### **FILIMONOV Alexey V.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
filimonov@rphf.spbstu.ru

### **ZHANG Nan**

*Xian Jiaotong University*  
28 Xianning W Rd, Jiaoda Commerce Block, Beilin, Xian, Shaanxi, China  
ic@mail.xjtu.edu.cn