

УДК 538.9

**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**Певцов Е.Ф.**, к.т.н., доцент, E-mail: pevtsov@mirea.ru

**Чуйко А.В.**, программист, E-mail: tchuiko@mirea.ru

МИРЭА, МГУПИ, Москва, Россия

**Аннотация.** Разработан макет экспериментального измерительного комплекса для исследований тонких сегнетоэлектрических пленок (СЭ) и устройств на их основе. Предложены методики комплексных измерений электрофизических характеристик слоистых структур с СЭ. В диапазоне температур от 20°...200°С получены данные по характеристикам переключения поляризации, вольт-фарадным и вольт-амперным характеристикам и пирозлектрическим свойствам. Показано, что комплексные измерения позволяют оптимизировать технологические процессы формирования СЭ структур с заданными свойствами. На основании полученных данных проведены количественные оценки параметров физических моделей, описывающих процессы поляризации СЭ, в частности, диэлектрических характеристик, пирозлектрического гистерезиса, проводимости, а также влияния дефектов и поверхностных энергетических барьеров в пограничных слоях возле металлических электродов.

**Ключевые слова:** аппаратно-программные средства NI, тонкие сегнетоэлектрические пленки, переключение поляризации, пирозлектрический ток, пирозлектрический коэффициент.

**SOFTWARE AND HARDWARE FOR RESEARCHES OF ELECTROPHYSICAL  
PROPERTIES OF STRUCTURES ON BASE OF ACTIVE DIELECTRICS**

**Pevtsov E.F.**, Candidate of Engineering, vice-professor, E-mail: pevtsov@mirea.ru

**Tchuiko A.V.**, programmer, E-mail: tchuiko@mirea.ru

**Abstract.** We designed laboratory automatic for ferroelectric thin films, which differs from analogous by open architecture. This equipment is quite adopted with hardware and software of the leading companies (e.g., LabView National Instruments) in the field of measuring technique and systems of data acquisition. It makes possible to carry out measuring of basic electrophysical characteristics of ferroelectrics: studying the ferroelectric hysteresis, determining pyroelectric coefficient by static and quasy-static techniques, taking magnitude of remanent polarization, measuring dielectric constants, measuring the specimen electrical conductance. The measuring system has open architecture and it is easy to readjust it to solve specific problems including applications, for example, optimization of technological processes of ferroelectric films fabrication for memory devices or uncooled focal plane arrays. Basing on this measuring system there were developed several methods which give an opportunity to improve the comprehension of processes in ferroelectric systems from physical point of view.

**Keywords:** NI software and hardware, thin ferroelectric films, ferroelectric hysteresis, pyroelectric current, pyroelectric coefficient.

## 1. Введение

Сегнетоэлектрические тонкие пленки широко применяются для разработок новых приборов микро и наноэлектроники. Примерами служат устройства энергонезависимой

памяти, матрицы инфракрасных приемников излучения, микроэлектромеханические датчики положений, акустические датчики и анализаторы спектра [1-3]. Таким образом, задача создания измерительного оборудования для исследований электрофизических свойств пленок активных диэлектриков и контроля характеристик структур на их основе становится весьма актуальной. В данной работе рассмотрен пример универсального измерительного комплекса, обеспечивающего решение этой задачи. Основой разработки служит система сбора и обработки данных, использующая достижения современных информационных технологий, в частности, аппаратные и программные средства компании пакета LabVIEW (National Instruments). Такое решение позволило оперативно и относительно малыми затратами создать комплекс измерительного оборудования, в котором комбинируются внешние стандартизованные средства измерений и устройства, встроенные в ПК, и который можно быстро перестраивать для обеспечения требуемых функциональных характеристик.

## **2. Аппаратно-программный комплекс оборудования для исследований электрофизических свойств структур с активными диэлектрическими пленками**

### ***2.1 Архитектура и программное обеспечение***

Измерительный комплекс состоит из двух функциональных модулей. Первый модуль предназначен для измерений диэлектрических характеристик и характеристик переключения поляризации структур с тонкими пленками активных диэлектриков. Второй модуль построен с необходимыми мерами по экранированию образцов и первичных цепей измерения и обеспечивает измерения вольт-амперных характеристик и исследования пироэлектрических свойств. При измерениях переключения поляризации и диэлектрических характеристик исследуемый образец располагается на термостатируемой план-шайбе зондовой аналитической установки ЭМ6030, что позволяет задавать температуру образца в диапазоне от 30 до 200°C и поддерживать ее с погрешностью менее  $\pm 1^\circ\text{C}$ . К контактным площадкам исследуемого образца с помощью микрометрических манипуляторов подсоединяются зонды, подключенные к коммутационному блоку со специальными герконовыми реле, обеспечивающими требуемую конфигурацию схемы измерений и малые токи утечки между контактами. К этому же блоку подключены измерительные приборы и узлы задания режимов измерения.

Особенностью данного измерительного комплекса является открытость архитектуры и простота программирования, что достигается за счет использования аппаратно-программных средств NI. Комплекс аппаратуры включает как

стандартизированные измерительные средства, так и встраиваемые платы (GPIB, АЦП, ЦАП), что позволяет проводить измерения вольт-фарадных, вольт-амперных, P-E (поляризованность – внешнее электрическое поле) и I-E (ток переключения поляризации – внешнее поле) характеристик, пирозлектрических коэффициентов в структурах с сегнетоэлектрическими, пирозлектрическими и диэлектрическими тонкими пленками. Нормированные метрологические характеристики комплекса обеспечиваются применением стандартных измерительных средств, соединенных с компьютером с помощью приборного бит-параллельного и байт-последовательного интерфейса обмена данными и сигналами управления. Для реализации интерфейса применяется плата PCI GPIB-PCIIa NI 488.2 и соответствующие программные модули LabVIEW. Для задания режимов измерения и развертки прикладываемого к образцам напряжения применяются платы расширения шин ISA и PCI, содержащие АЦП и ЦАП, а также внешние приборы: генераторы сигналов Г3-109, Г6-33 или блоки питания Б5-48 и LPS-304 (Mothee Industries Inc., Taiwan), управляемые через USB, COM или LPT порты ПК.

### ***2.2. Исследования процессов переключения поляризации в структурах с пленками сегнетоэлектриков***

Управление работой комплекса осуществляется программой, разработанной в среде программирования и конфигурирования аппаратуры LabVIEW. Измерительный комплекс позволяет регистрировать сегнетоэлектрический гистерезис по изменению напряжения или тока на измерительной емкости (схема измерения заряда, P-E характеристики) или сопротивления (схема измерения тока, I-E характеристики) при значениях емкости измеряемого образца от 20 пФ до 10 нФ на частотах от 0.01 Гц до 10 кГц, амплитуде приложенного напряжения треугольной или синусоидальной формы до 200 В с минимальной чувствительностью по напряжению 5 мВ/дел. и по току 10 мкА/дел. Регистрирующим прибором служит цифровой запоминающий осциллограф С9-8, развертка задается платой с ЦАП или генератором Г3-109.

Примеры графического интерфейса пользователя виртуального устройства наблюдения сегнетоэлектрического гистерезиса и соответствующего программного модуля приведены на рис.1 и рис.2.

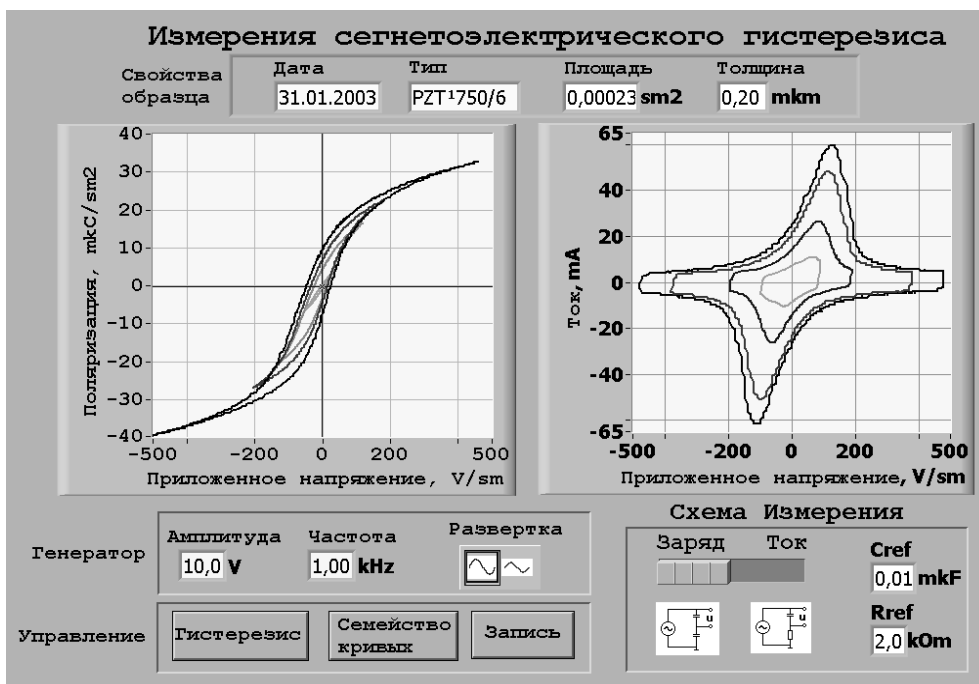


Рис.1. Интерфейс пользователя виртуального прибора для регистрации сегнетоэлектрического гистерезиса, реализованный в среде LabVIEW.

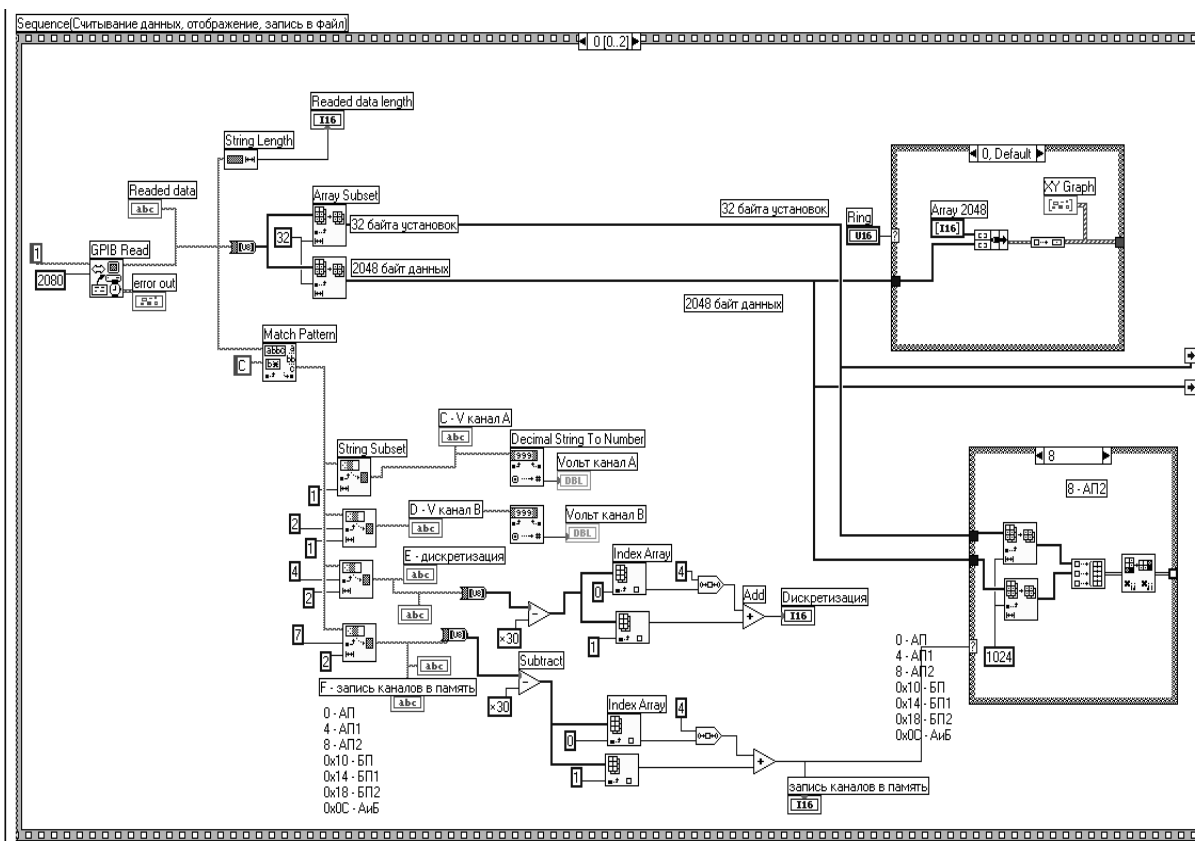


Рис.2. Фрагмент программного модуля LabVIEW для передачи данных от цифрового осциллографа С9-8 в ПК через плату интерфейса PCI-GPiB NI 488.2.

Другой метод исследований процессов в сегнетоэлектрике заключается в определении его отклика на переключение полярности прямоугольными импульсами

приложенного напряжения. Методика аналогична способам измерений, использованным для контроля пленок для элементов сегнетоэлектрической памяти, и поясняется рис. 3.

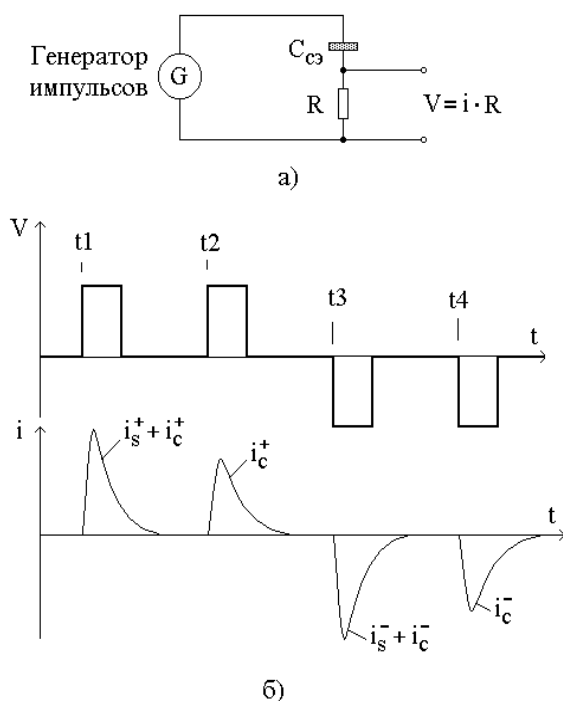


Рис. 3. Измерения поляризации импульсным методом последовательно из двух импульсов переключения с вычитанием тока заряда сегнетоэлектрического конденсатора: а) схема измерения; б) метод измерения.

Поскольку при переключении поляризации ток через сегнетоэлектрический конденсатор содержит как емкостную, так и переключательную составляющие, то измерения проводятся для последовательности из двух пар одинаковых импульсов напряжения противоположной полярности. При этом перед подачей каждого второго импульса напряжения образец оказывается уже поляризованным, и токовый отклик содержит только емкостную составляющую. Четыре кривые тока запоминаются в виде соответствующих цифровых данных и обрабатываются в ПК по заданному алгоритму. Полный заряд переключения поляризации определяется как интеграл по времени разности зарегистрированных токов после первого и второго импульсов одной полярности. Амплитуда и полярность поляризующих импульсов задаются внешним генератором или специально изготовленным блоком задания уровней напряжения. Вид тестирующей последовательности можно изменять программно или перестройкой логической схемы, входящей в состав блока задания уровней.

Таким образом, измерительный комплекс, снабженный платами PCI-GPIB NI 488.2 и PCI-6024E, позволяет исследовать процессы переключения поляризации сегнетоэлектрических материалов с программируемой последовательностью

двуполярных импульсов переключения с амплитудой от -15 до +15 В с временем нарастания импульса не более 0.2 мкс и максимальной частотой периодической последовательности не менее 300 кГц.

Пример графического интерфейса пользователя виртуального прибора измерения кривых переключения поляризации представлен на рис. 4. Данная методика применяется при исследованиях материалов, предназначенных для микросхем энергонезависимой памяти на основе структур с сегнетоэлектриками.

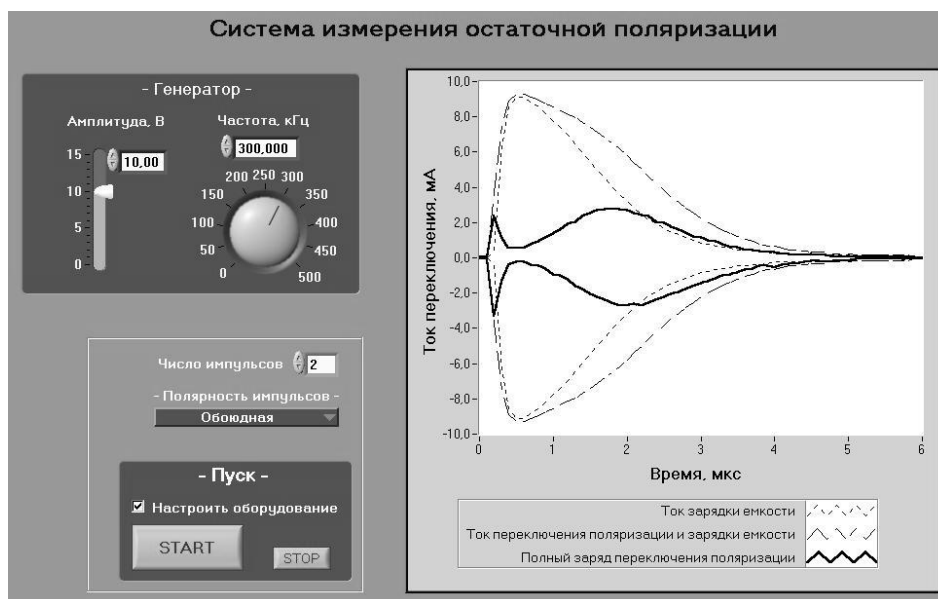


Рис. 4. Пример кривых переключения на структуре с ЦТС Si / SiO<sub>2</sub> (0.5 мкм) / Ti (0.01 мкм) / Pt (0.1 мкм) / Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub> (0.25 мкм) / Pt (0.1 мкм)), площадью 200×200 мкм<sup>2</sup>.

### 2.3. Измерения диэлектрических характеристик

Диэлектрические характеристики измеряются при помощи измерителей иммитансов E7-12, E7-14 и LCR-819, а также модулей PCI-6024E и NI USB-9215. Эти приборы отличаются частотами тестового сигнала, что позволяет проводить исследования методами диэлектрической спектроскопии в диапазоне частот от 100 Гц до 10 МГц. Развертка задается как от встроенных источников напряжения, так и от внешних управляемых по LPT и COM портам источников. Пример интерфейса комплекса при измерениях вольт-фарадных характеристик образца пленки цирконата титаната свинца приведен на рис. 5.

На основании измерений диэлектрических характеристик в данной работе изучены эффекты влияния переходных слоев на свойства структур с сегнетоэлектрическими пленками, предназначенными для инфракрасных приемников и элементов энергонезависимой памяти. По виду зависимости  $1/C^2$  от приложенного напряжения

определены параметры модели переходных слоев с барьерами Шоттки [4]. Получено, что падения напряжений на промежуточных слоях зависят как от технологических режимов изготовления слоистых структур, так и от избыточного содержания свинца в исходных растворах, и могут изменяться от десятых долей вольт до нескольких вольт, что следует учитывать при создании новых устройств на основе сегнетоэлектриков.

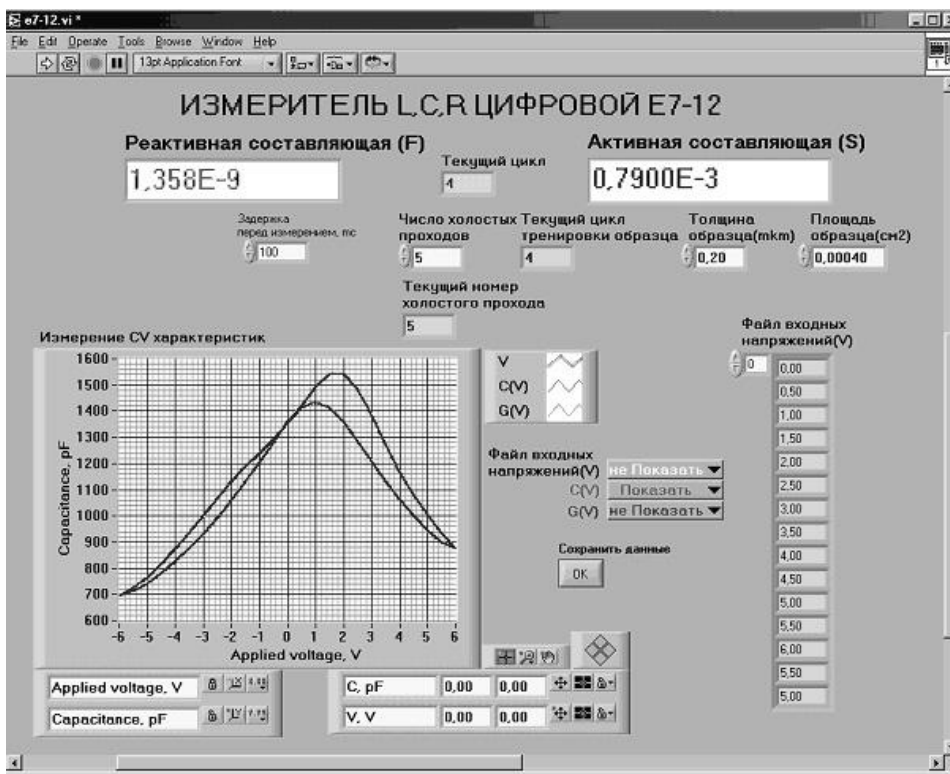


Рис.5. Интерфейс измерительного комплекса и результаты измерения вольт-фарадных характеристик структуры с сегнетоэлектрической пленкой ЦТС.

#### 2.4. Исследования пирозлектрических свойств

Функциональная схема модуля для исследований пирозлектрических свойств и контроля статических токов утечки представлена на рис. 6.

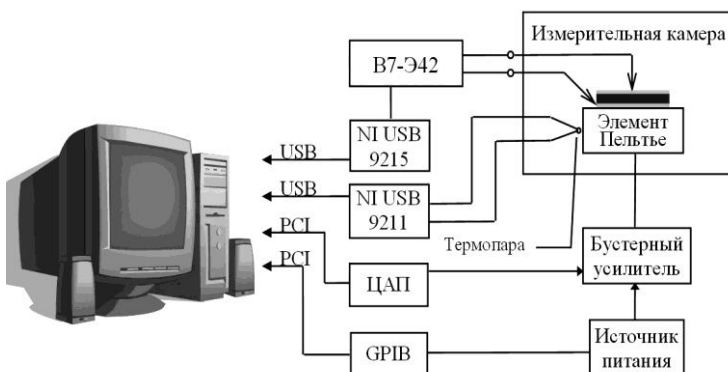


Рис. 6. Схема исследований пирозлектрических свойств.

При измерениях пирозлектрического коэффициента используется метод низкочастотной модуляции температуры образцов. Методики измерений структур на основе сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС) приведены в работе [6]. Для реализации этого метода в состав комплекса включены: генератор сигналов специальной формы, задающий режим температурной модуляции элемента Пельтье и выполненный на базе модуля ЦАП платы PCI-6024E; источник питания и бустерный усилитель тока, предназначенный для усиления сигнала генератора; USB-модуль сбора данных NI USB-9211, использующийся для получения сигнала термопары; вольтметр электрометрический В7-Э42. Данные об измерениях модулированного пирозлектрического тока поступают в ПК от аналогового выхода электрометрического вольтметра, подключенного к устройству сбора данных NI USB-9215. Период модуляции температуры задается в пределах от 0,1 до 50 С, амплитуда  $1^{\circ}\dots 5^{\circ}\text{C}$ , предельная чувствительность по току составляет  $10^{-12}\text{ A}$ , относительная погрешность измерений пирозлектрического коэффициента не превышает 20%.

Интерфейс виртуального прибора для вывода данных о температуре образца и пирозлектрическом токе короткого замыкания и вид соответствующего программного модуля прибора приведены на рис. 7.

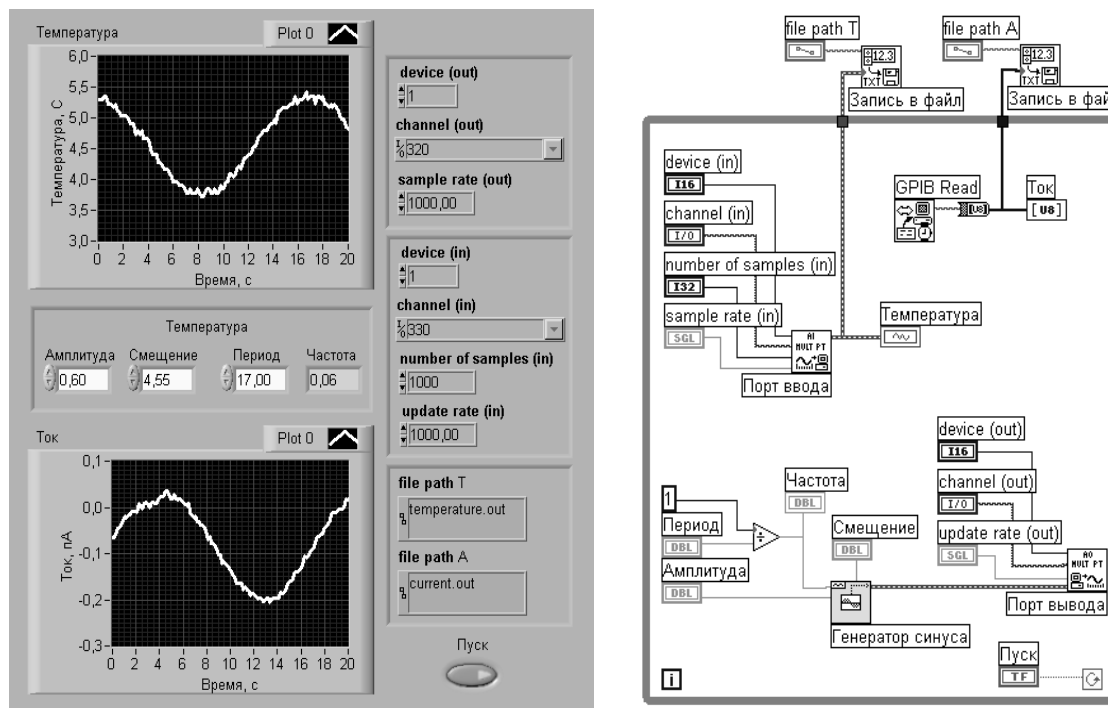


Рис. 7. Интерфейс виртуального прибора и диаграмма управления работой для определения пирозлектрических токов при модуляции температуры.



На основе данного измерительного модуля проведены исследования взаимосвязи между состоянием поляризации СЭ-пленки и пирозлектрическим коэффициентом (пирозлектрический гистерезис). Для определения параметров этой модели перед каждым измерением пирозлектрического тока образец предварительно приводился в заданное начальное состояние поляризации и затем переполаризовывался несколькими импульсами напряжения с изменяемой амплитудой. Полученные значения пирозлектрических коэффициентов сопоставлялись с результатами измерений остаточной поляризации. В результате показано, что значение коэффициента пропорциональности между поляризацией и пирозлектрическим коэффициентом для исследуемых пленок ЦТС составило  $(2.08 \pm 0.05) \cdot 10^{-3}$  1/К при доверительной вероятности 0.95. Эти результаты имеют важное прикладное значение, так как подтверждают перспективность применения пленок ЦТС как сред с перестраиваемыми характеристиками в микроэлектронных устройствах преобразования данных. Примером подобного устройства может служить аналоговый процессор для выполнения операций свертки сигналов, представляющей собой интегральную схему с пирозлектрической матрицей приемников излучения, формирующих первый массив данных, и прибором с зарядовой связью, формирующим второй массив сигналов для перемножения [5].

### **Заключение**

Разработанный комплекс аппаратуры и его программное обеспечение апробированы при исследованиях свойств образцов пленок сегнетоэлектрической керамики и сополимеров винилиденфторида, предназначенных для многоэлементных пирозлектрических приемников излучения и для устройств сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти.

Разработанный на основе современных информационных технологий и встраиваемых модулей специализированный аппаратно-программный комплекс для исследований электрофизических свойств структур на основе активных диэлектриков имеет характеристики, не уступающие зарубежным аналогам. Открытая архитектура, комплекса позволяет наращивать диапазон контролируемых параметров. Сравнение с измерительным комплексом RT-66 [7] (производитель - Radiant Technologies, USA), показывает, что выполненная разработка отличается большими функциональными возможностями, имеет значительно меньшую стоимость.

**Список литературы**

1. К.А.Воротилов, А.С.Сигов. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства // Физика твердого тела, 2012, том 54, вып. 5. – С. 843-848.
2. Long Zeng ; Gang Sheng ; Zhenlun Zhang and Pingxiong Yang Preparation of BST ferroelectric thin films by pulsed laser deposition for infrared sensor // Proc. of SPIE Vol. 7518, 75180U, (October 12, 2009).
3. Xiaoming Wu, Yi Yang, Jian Cai, Tianling Ren, Litian Liu. Integrated Ferroelectrics. – V.69, pp. 417/[1959]-430/[1973], 2005.
4. Maleto M., Pevtsov E., Sigov A., Svitina A. Polarization Switching and Dielectric Properties of Ferroelectric Thin Films // Ferroelectrics. – V.286, pp.301-309, 2003.
5. Pevtsov E., Sigov A., Pyzhova A., Gorelov A. The investigations of ferroelectric thin films in virtual measuring system // “Micro- and Nanoelectronics 2003” Proceedings of SPIE. – V.5401, pp.520-524, 2004.
6. М.И. Малето, Е.Ф. Певцов, А.В. Чуйко. «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments-2013» / Сборник трудов XII международной научно-практической конференции, 28-29 ноября 2013 г.- Москва. – С. 32-37.
7. <http://www.ferrodevices.com/1/297/index.asp> (дата обращения: 21.04.2015)