

**Розробка засобів проєктування та технології виготовлення енергонезалежних сегнетоелектричних запам'ятовуючих пристроїв підвищеної швидкодії комп'ютерних систем критичного застосування.**

**Разработка средств проектирования и технологии изготовления энергонезависимых сегнетоэлектрических запоминающих устройств повышенного быстродействия компьютерных систем критического применения.**

**Development of design tools and technology for the production of nonvolatile ferroelectric storage devices for high-performance critical-computer systems.**

**1. Номер державної реєстрації теми - 117U002505,**

**2. Науковий керівник – д.т.н., проф. Стиренко С.Г., Стиренко С.Г., Styrenko Serdii G.**

**3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Обґрунтовано застосування щільних високочастотних (ВЧ) катодних джерел з непрямим охолодження мішені для пошарового осадження компонентів на підкладку з їх переміщенням над поверхнею мішені. Допрацьовано конструкції джерел для осадження сегнетоелектричної плівки із оксидів цирконію-гафнію та цирконату-титанату свинцю, орієнтованих на застосування мішеней з розмірами 68x30x5мм із порошків оксидів гафнію, цирконію, титану, свинцю.

Розроблено альтернативну технологію осадження сегнетоелектричної плівки з високим рівнем стехіометрії компонентів, яка базується на використанні створеного ВЧ катодного розпилення одно та багатокомпонентних мішеней для осадження плівки на кремнієві підкладки діаметром 40 мм. Основою технології елементів, накопичувачів є застосування високопровідних стійких бар'єрних шарів оксидів з хрому, нікелю та кобальту між поверхнями плівки та електродами. Отримано якісну плівку оксиду цирконату-титанату свинцю  $Pb(Zr,Ti)O_3$  в 30 нм. Надто важливим в технології є застосування акустичної стимуляції.

Розроблено методику вимірів характеристик імпульсного перемикання поляризації надтонкої сегнетоелектричної плівки, досліджено електричну поляризацію елементів на товстій (100 мкм) та тонкій (30-100 нм) плівці. Розроблено та доопрацьовано математичні моделі поляризації, що визначають залишкову поляризацію в конденсаторі від часу дії та амплітуди імпульсних сигналів перемикання, і на їх основі розроблено поведінкові моделі, які визначають зміну поляризації з часом при довільній формі сигналу на конденсаторі. Розроблено моделі елементів і накопичувачів системи автоматизованого проєктування пристроїв в середовищі PSPICE. Виконано схемотехнічне, технологічне та топологічне проєктування експериментальних зразків накопичувачів з руйнівним та неруйнівним зчитуванням, виготовлено та досліджено комплекти фотошаблонів та накопичувачі зі структурою 16x16 та 32x16 (чисел- x-розрядів).

**(рос.)**

Обосновано применение целевых высокочастотных (ВЧ) катодных источников с косвенным охлаждением мишени для послойного осаждения компонентов на подложку из их перемещением над поверхностью мишени. Доработаны конструкции источников для осаждения сегнетоэлектрических пленки с оксидов циркония-гафния и цирконата-титаната свинца, ориентированных на применение мишеней с размерами 68x30x5мм из порошков оксидов гафния, циркония, титана, свинца.

Разработано альтернативную технологию осаждения сегнетоэлектрических пленок с высоким уровнем стехиометрии компонентов, основанная на использовании

созданного ВЧ катодного распыления одно и многокомпонентных мишеней для осаждения пленки на кремниевые подложки диаметром 40 мм. Основой технологии элементов, накопителей применение высокопроводящего устойчивых барьерных слоев оксидов из хрома, никеля и кобальта между поверхностями пленки и электродами. Получено качественную пленку оксида цирконата-титаната свинца Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub> в 30 нм. Весьма важным в технологии является применение акустической стимуляции.

Разработана методика измерений характеристик импульсного переключения поляризации сверхтонкой сегнетоэлектрической пленки, исследована электрическая поляризацию элементов на толстой (100 мкм) и тонкой (30-100 нм) пленке. Разработаны и доработаны математические модели поляризации, определяющих остаточную поляризацию в конденсаторе от времени действия и амплитуды импульсных сигналов переключения, и на их основе разработаны поведенческие модели, которые определяют изменение поляризации со временем при произвольной форме сигнала на конденсаторе. Разработаны модели элементов и накопителей системы автоматизированного проектирования устройств в среде PSPICE. Выполнено схемотехническое, технологическое и топологическое проектирование экспериментальных образцов накопителей с разрушающим и неразрушающим считыванием, изготовлено и исследовано комплекты фотошаблонов и накопители со структурой 16x16 и 32x16 (чисел- x-разрядов).

(англ.)

The use of slit high-frequency (HF) indirect cathode sources with indirect cooling of the target for the layer-by-layer deposition of the components on the substrate with their movement over the target surface is substantiated. Designs of sources for the deposition of ferroelectric film from zirconium-hafnium oxides and lead zirconate-titanate, focused on the use of targets with dimensions 68x30x5mm from powders of hafnium, zirconium, titanium, lead oxides, have been finalized.

An alternative technology for depositing a ferroelectric film with a high level of stoichiometry of components is developed, based on the use of the created RF cathodic sputtering of single and multi-component targets for deposition of a film on silicon substrates with a diameter of 40 mm. The technology of the elements, the drives, is based on the application of high conductive barrier layers of oxides of chromium, nickel and cobalt between the film surfaces and the electrodes. A quality film of lead zirconate-titanate oxide Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub> at 30 nm was obtained. Too important in technology is the use of acoustic stimulation.

A method for measuring the characteristics of the pulse switching polarization of a superfine ferroelectric film has been developed, and the electrical polarization of elements on a thick (100 μm) and thin (30-100 nm) film has been investigated. Mathematical models of polarization, which determine the residual polarization in the capacitor from the action time and amplitude of the switching pulse signals, have been developed and refined, and based on them behavioral models have been developed that determine the polarization change with time at an arbitrary signal on the capacitor. The models of elements and drives of the computer-aided design system of devices in the PSPICE environment have been developed. Schematic, technological and topological design of experimental samples of drives with destructive and non-destructive readings were performed, sets of photo templates and drives with structure 16x16 and 32x16 (numbers-x-digits).

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності**

1. Dietmar Krueger; Rainer Kurps, of Frankfurt an der Oder (DE); Boris Romanjuk, Kiev (UA); **Viktor Melnik**, Kiev (UA); Jaroslav Olich, Kiev (UA). Method of fabricating ion

implanted doping layers in semiconductor materials and integrated circuits made therefrom. Patent US 6358823 B1, Дата публікації 09.04.2002 р

2. Верба О.А., Мартинюк Я.В., Самофалов К.Г. Сегнетоелектричний енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій/ Патент України на корисну модель № 35574 від 25.09.2008. Бюл. №18.

3. Верба О.А., Мартинюк Я.В., Самофалов К.Г. Сегнетоелектричний запам'ятовуючий пристрій/ Патент України на корисну модель № 37367 від 25.11.2008. Бюл. № 22

4. Мартинюк Я.В., Верба О.А., Божко А.П. та ін. Ультразвуковий п'єзоелектричний перетворювач. Патент України на корисну модель № 39152 від 10.02.2009. Бюл. №3.

5. Мартинюк Я. В., Грищенко О. М. Спосіб та установка для обробки пластин. Патент України на винахід №799004 від 10.07.2012 р. Бюл. №13

6. Клето Г.І. Сегнетоелектричний конденсатор. Патент України на корисну модель №87094. – 2013. Бюл №2.

7. Обедзинський Ю.К. , Клето Г.І., Мартинюк Я.В., Савчук А.Й., Юрійчук І.М., Обедзинський О.Ю. Електронний пристрій для вимірювання параметрів сегнетоелектричних конденсаторів. Патент України на корисну модель №107 463 - 2016.- Бюл № 11.

## 5. Порівняння зі світовими аналогами.

За останнє десятиліття відсутні суттєві зрушення у збільшенні ємності сегнетоелектричної пам'яті FRAM. Ємність пристроїв зі значними функціональними перевагами і широкому застосуванні не перевищує 10Мбіт. Відсутні досконалі технології виготовлення надтонкої сегнетоелектричної плівки та запам'ятовуючих елементів в одиниці-десятки нанометри. Реально використовується біля 100нм для застосуваних матеріалів системи ЦТС. Напрацювання по створенню плівки на основі оксидів гафнію, цирконію в одиниці десятків нанометрів не забезпечують створення елементів за низької їх стійкості по числу циклі перезапису. Викладене відображають гунтовні оглядові статті останніх років: 1) Min Hyuk Park, Young Hwan Lee, Thomas Mikolajick, Uwe Schroeder, Cheol Seong Hwang. Review and perspective on ferroelectric HfO<sub>2</sub>-based thin films for memory applications. Published online: 28 August 2018, Volume 8, Issue 3. Uwe.Schroeder@namlab.com, <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.175> (Обзор и перспективы использования тонких пленок сегнето-электрика на основе HfO<sub>2</sub> для применения в памяти); 2) Scaling Effects in Perovskite Ferroelectrics: Fundamental Limits and Process-Structure-Property Relations. Jon F. Ihlefeld<sup>‡,†</sup>, David T. Harris<sup>§,k</sup>, Ryan Keech, Jacob L. Jones<sup>§</sup>, Jon-Paul Maria<sup>§</sup>, and Susan Trolrier-McKinstry. First published: 05 July 2016. <https://doi.org/10.1111/jace.14387> (Масштабирующие эффекты в перовскитных сегнетоэлектриках: фундаментальные пределы и отношения процесса-структуры-свойства).

Результати відповідають світовому рівню. Застосування нових технологій з використанням акустичної стимуляції відкриває перспективу вирішення роблемного питання зниження товщини сегнетоелектричної та створення пристроїв пам'яті FRAM з високими проектними нормами.

## 6. Економічна привабливість для просування на ринок

Попередні лабораторні дослідження та результати підтверджують можливість створення пристроїв пам'яті FRAM з високими проектними нормами до 10 нм та досягнення ємності пам'яті наближеної до ємності пам'яті flash, зокрема на накопичувача з матриць сегнетоелектричних конденсаторів, що визначає економічну привабливість та перспективу просування розробки на ринок.

Проект направлений на вирішення актуального завдання: створення енергонезалежних накопичувачів (електронних дисків) зовнішньої пам'яті ЕОМ. Сегнетоелектрична пам'ять за комплексом параметрів – продуктивності (швидкодії) запису, зчитування, кількості циклів, надійності. Пам'ять серійно виробляється і широко застосовується. Потребує досягнення переваг за величиною ємності, Незаперечною перевагою даної пам'яті є її стійкість від дії негативних факторів, застосування за спеціальним призначенням, може стати джерелом відродженням вітчизняного мікроелектронного виробництва.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Підприємства електронної промисловості, Мінпромполітики України. На сьогодні ДП НДІ Мікроприладів, НДІ Оріон та Інститути НАНУ: ядерних досліджень та фізики напівпровідників, м. Київ.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблено та виготовлено технологічне обладнання, лабораторна технологія виготовлення макетних зразків матричних накопичувачів на п'єзоелектричних перетворювачах та сегнетоелектричних конденсаторах оперативної та зовнішньої пам'яті. За результатами спільних досліджень передбачається створити дослідну технологію розробки та виготовлення зразків сегнетоелектричних запам'ятовуючих пристроїв в ДП НДІ Мікроприладів.

#### **9. Існуючі результати впровадження**

В 90-х роках спільно ДП НДІ Мікроприладів, Київським політехнічним інститутом та Чернівецьким національним університетом спільно виконувались розробки зразків запам'ятовуючих пристроїв на активних матрицях сегнетоелектричних конденсаторів. Відсутність замкнутого циклу дослідної технології за даним напрямом робіт в ДП НДІ Мікроприладів та призупинення мікроелектронного виробництва в наступному не дозволило довести розробки до завершення. Очікується, що розвиток досліджень на пасивних матрицях сегнетоелектричних конденсаторів та п'єзоелектричних перетворювачів при суттєвому зменшенні вимог до напівпровідникових структур в пристроях пам'яті та створення дослідної технології в НДІ Мікроприладів дозволить отримати позитивні результати та впровадити розробки у виробництво.

#### **9. Форма участі інвестора**

Краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора: частка в проект 50%.

#### **10. Обсяг інвестицій**

Обсяг інвестицій визначається на стадії виконання дослідно-конструкторських розробок.

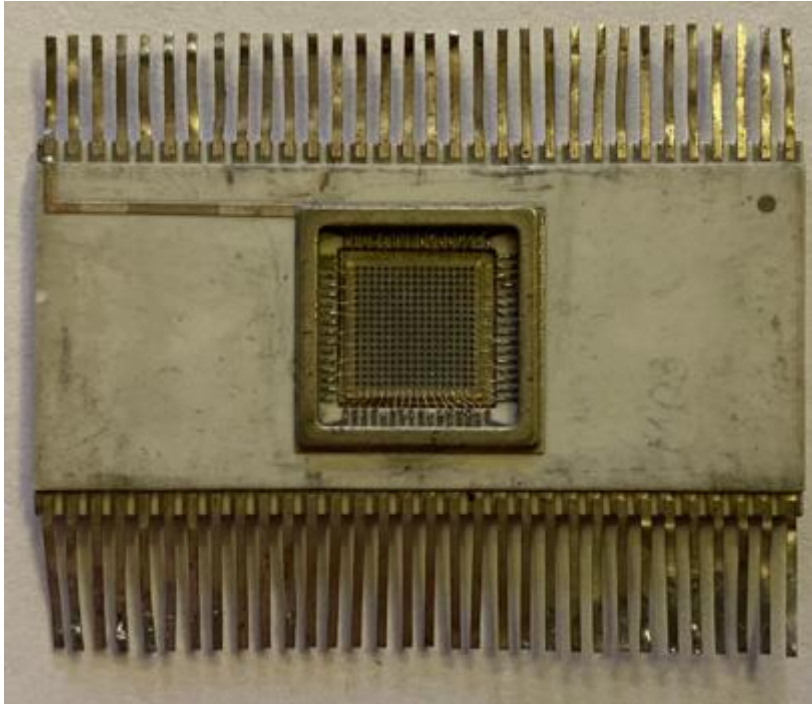
#### **11. Мета інвестицій**

Відновлення вітчизняного мікроелектронного виробництва..

#### **12. Назва організації, телефон, E-mail**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Факультет інформатики та обчислювальної техніки, (044)

#### 14. Фото розробки



Макетний зразок матричного накопичувача на п'єзоелектричних перетворювачах зі структурою 16x16 (чисел-х-розрядів).

#### 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

##### Монографія

Теплопровідність надтвердих матеріалів / І.П.Фесенко, Д. В.Часник, >Я.В. Мартинюк< та ін. –Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В., 2018, 2-е вид. - 68 с. ISBN 978-617-7708-01-7 . 302-308

##### Наукові статті

1. A.I. Savchuk, P.M. Fochuk, V.V. Strebezhev, >G.I. Kleto,< I.M. Yuriychuk, Y.B. Khalavka, Yu.K. Obedzynskyi, V.M. Strebezhev /The effect of laser treatment on the morphology and structure of CdSb-Cd<sub>1-x</sub>MnxTe and CdSb-In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Te<sub>3x</sub> thin film heterojunctions // Applied Surface Science Volume 418, Part B, Pages 536-541, October 2017, IF=3,387.

2. I.D. Stolyarchuk , >G.I. Kleto,< A. Dziedzic / Structural and optical properties of Co and Ni doped ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering //ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА, Т. 18, № 3 (2017) С.

3. Т.М. Sabov, O.S. Oberemok, O.V. Dubikovskiy, >V.P. Melnik,< V.P. Kladko, B.M Romanjuk, V.G. Popov, O.Yo. Gudymenko, N.V. Safriuk / Oxygen ion-beam modification of vanadium oxide films for reaching a high value of the resistance temperature

coefficient // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 20 (2), P. 153-158 (2017).

4. Кладько В.П., Голтвянський Ю.В., Романюк А.Б., > Мельник В.П., < Оберемок О.С., Федулов В.В., Сабов Т.М., Сафрюк Н.В. /Спосіб виготовлення фото-діодів на антимоніді індію // *Патент України* на корисну модель №115174, (10.04.2017)

5.E.N. Zubarev, O.Yu.Devizenko, V.V. Kondratenko, D.V.Sevriukov, V.A/Sevriukova, O.S. Garbuz, T.M. Sabov, O.V. Dubikovskiyi, J.S/ Oderemok, and > V.P. Melnsk<. Explosiver Crystallization of Films of Amorphous on a Sublayer of Carbon // "METALLOFIZIKAI NOVEEISIE TEKHNOLOGII" vol. 40, pp. 359-379 (2018).

6. V.V. Korotyeyev, V.O. Kochelap, S.V/ Sapon, B.M. Romaniuk, >V.P. Melnik,< O.V. Dubikovskiyi, T.M. Sabov. Be-ion implanted p-n InSb diode for infrared applications. Modeling, fabrication and characterization// *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*, 21 (3), p. 294-306 (2018).

7. A. Podolian, A. Nadtochiy, O. Korotchenkov, B. Romaniuk, >V. Melnik,< V. Popov. Enhanced photoresponse of Ge/Si nanostructures by combining amorphous silicon deposition and annealing, *Journal of Applied Physics*, 124, 095703 (2018).

#### Публікації у матеріалах конференцій

1. Оберемок О.С., Сабов Т.М., Дубіковський О.В., Косуля О.В., >Мельник В.П.,< Кладько В.П., Романюк Б.М., Попов В.Г., Гудименко О.Й., Сафрюк Н. Оптичні та структурні особливості плівок оксидів перехідних металів модифікованих іонною імплантацією. 8-ма Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології".(СЕМСТ-8), Україна, Одеса, 28 травня – 1 червня 2018 р. Тези доповідей. Одеса, «Астропринт», с. 30

2. >V. P. Melnik,< B.M. Romanyuk, V.P. Kladko, V.G. Popov, O.Yo. Gudymenko, O.I. Liubchenko, T.M. Sabov, O.S. Oberemok, O.V. Dubikovskiyi, Ju.V. Gomeniuk. Electrical, structural and photoelectric features of thin ZnO:Al films on Si wafers. Materials of X International Conference «Topical problems of semiconductor physics», Truskavets, Ukraine, June 25 – 28, 2018, p.104-107

3. Оберемок О.С., Сабов Т.М., Дубіковський О.В., Косуля О.В., >Мельник В.П.,< Кладько В.П., Романюк Б.М., Попов В.Г., Гудименко О.Й. Формування ізотипного гетеропереходу ZnO/Si. Матеріали першої Міжнародної науково-практичної конференції «Елементи, прилади та системи електронної техніки (Elements, devices and systems of electronic technique)» (EDSET-2018) 14 - 16 листопада 2018 р. Запоріжжя, Україна, с.64-65.

4. O.S. Oberemok, T.M. Sabov, O.V. Dubikovskiyi, >V.P. Melnik,< V.P. Kladko, B.M. Romanyuk, V.G. Popov, O.Yo. Gudymenko, N.V. Safriuk / Formation of vanadium oxide films with a high resistance temperature coefficient by oxygen ion implantation // "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2017), Chernivtsi, August 23 to 26, 2017. p.234.

5. T. Sabov, O. Dubikovskiyi, O. Oberemok, >V. Melnik< / Investigation of phase boundaries in Mo/Si periodic multilayer structures by SNMS method // 21<sup>st</sup> International Conference on Secondary.

6.Карнаух В.Я., Мартынюк Я.В. Входное сопротивление элементарного пьезоэлектрического излучателя. Матеріали Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ" і Десята міжнародна науково-технічна конференція студентів та аспірантів «ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ», м. Київ,  
16–20 квітня 2018 року, с. 423-426.

Підготовлені заявки на отримання патентів України:

1. >Мартинюк Я.В.,< >Корабльов Г.Ф.,< >Клето Г. І.< та ін. Катод плазмового розпилення та осадження плівки з непрямим охолодженням мішені.

2. >Мартинюк О.Я.,< >Корабльов Г.Ф.,< >Мельник В.П.< та ін.. Пристрій введення ультразвукових коливань та напружень в кремнієві пластини для акустичної стимуляції технологічних процесів.

3. >Мартинюк Я.В.<, >Геращенко Д.В. <. Метод дослідження та побудови математичної моделі процесу перемикання електричної поляризації в сегнетоелектричному конденсаторі.

**16.** Надати ключові слова до розробки: СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЛІВКИ, ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ, ТЕХНОЛОГІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ.