

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.315.61

*На правах рукописи*

ПРОВАЛОВ  
Егор Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОПОЛЕВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТОНКИХ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 – Технология приборостроения

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**ЧИГИРЬ Григорий Григорьевич,**  
кандидат технических наук, заместитель директора Государственного Центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» Филиал «Белмикросистемы»

Рецензент:

**ПОЛОЗКОВ Юрий Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

Защита диссертации состоится «**27**» июня 2018 г. года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, корп. 1, ауд. **415**, тел.: 293-20-80, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические пленки во многом определяют надежность интегральных микросхем (ИМС). Это обусловлено достаточно сложными физическими механизмами, лежащими в основе зарядовых свойств и их изменением при эксплуатации ИМС. Известно, что зарядовая нестабильность диэлектрических слоев приводит к изменению параметров базовых элементов и отказу ИМС. По этой причине разработка методов анализа зарядовых свойств диэлектрических слоев ИМС является актуальной задачей, решение которой позволит определить пути повышения качества и надежности современных субмикронных ИМС, что составляет одну из главных целей настоящей работы.

Существующий метод контроля зарядовой нестабильности основан на использовании оборудования фирмы *Agilent*, США и программного обеспечения *IBASIC*. Данное оборудование позволяет проводить контроль напряжения плоских зон с погрешностью  $\pm(10 - 50)$  мВ. Для обеспечения контроля зарядовой стабильности субмикронных ИМС требуется проводить контроль напряжения плоских зон с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ.

Для решения этой задачи требуется разработка метода контроля зарядовой нестабильности, основанного на использовании специального пакета программного обеспечения *Agilent VEE*. *Agilent VEE* – это мощная графическая инструментальная среда программирования, предназначенная для анализа результатов измерений. Развитые средства системной интеграции, отладки, структурный вид программ и удобная документация позволяет значительно упростить разработку задач измерений. *Agilent VEE* автоматизирует процесс конфигурации измерительных приборов, ускоряет процесс создания интерфейсов оператора, рационализирует тестовые последовательности и упрощает процесс распределенного создания программ.

Вышесказанное определило направления диссертации: разработка варианта установки для проведения термополевых испытаний; и варианта процесса, использование которого позволяет достичь необходимой автоматизации операций. Разработка метода, который в совокупности с существующими методами контроля параметров диэлектрических слоев позволит проводить комплексный анализ зарядовых характеристик диэлектрических слоев субмикронных микросхем.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Постоянное уменьшение проектных норм ИМС предъявляет повышенные требования к качеству слоев, входящим в состав ИМС. Основная тенденция современной микроэлектроники – постоянное повышение надежности ИМС. Ухудшение параметров *p*-МОП-транзисторов, вызванное носите-

лями высокой энергии («горячие» носители) является важной проблемой надежности в современных схемах.

«Горячие» носители создаются большими электрическими полями канала в области стока. Эти носители разрушают связи на границе раздела  $Si/SiO_2$ . По этой причине работы по анализу деградации параметров  $p$ -МОП-транзисторов, обусловленной горячими носителями, являются весьма актуальными.

### **Степень разработанности проблемы**

На данный момент существует значительное количество публикаций в данной области. Наиболее значимые результаты получены белорусскими и российскими учеными: Горловым М.И., Королевым С.И., Петлицкой Т.В., Чигирём Г.Г., Новиковой А.А., В.В. Андреевым. Среди иностранных ученых стоит отметить работы *D. Walters, M. Wang, C. Huang, F. Jones* и др.

В то же самое время, не в полной мере решены вопросы разработки методов анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев субмикронных микросхем с проектными нормами до 0,18 мкм. Их разработка позволит решить задачу получения информации о стабильности зарядовых характеристик при термополевых испытаниях с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации разработка методик проведения термополевых испытаний ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм и проведение ускоренных испытаний  $p$ -МОП транзисторов серийно выпускаемых КМОП микросхем.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- анализ требований надежности к  $p$ -МОП транзисторам КМОП ИМС;
- выработка технических решений по проведению термополевых испытаний;
- установление характеристик подзатворного слоя КМОП ИМС, а также граничных условий для проведения термополевых испытаний.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В работе произведены общенаучные методы сравнительного анализа, методы оценки количественной и качественной эффективности  $p$ -МОП транзисторов КМОП ИМС.

В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: структурный и сравнительный анализ, метод формализации. В диссертации используется системный подход к разработке методик испытаний.

В основу изложения научных результатов положена гипотетико-дедуктивная схема научного исследования.

*Информационная база* исследования сформирована на основе открытой информации, предоставляемой производителями ИМС, нормативно-правовых документов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

### **Научная новизна**

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в разработке и верификации модели экономического роста стран, заимствующих технологии, учитывающей ключевые каналы диффузии технологий и условия их работоспособности.

*Теоретическая значимость* диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к разработке экономически и функционально эффективных методик термополевых испытаний КМОП ИМС.

*Практическая значимость* диссертации состоит в том, что на основе предложенных методов возможна разработка соответствующих технологических процессов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методика применения программного обеспечения на основе специального пакета программного обеспечения *Agilent VEE* для автоматизированных измерений и анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев субмикронных микросхем, что позволяет получать данные о стабильности зарядовых характеристик диэлектрических слоев с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ и обеспечивает возможность анализа ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм.

2. Экспериментально полученные характеристики исследуемых КМОП ИМС: толщина подзатворного диэлектрика микросхем находилась в диапазоне от 7 до 95 нм; объемная концентрация подвижных ионных загрязнений в подзатворном диэлектрике превышает  $N_{ion\_макс} = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

3. Установлена граничная толщина подзатворного диэлектрика величиной 10 нм для термополевых испытаний, при меньших толщинах диэлектрика граничный метод ТПИ применять не целесообразно, т.к. даже при максимальных уровнях ионных загрязнений сдвиги напряжения плоских зон будут намного ниже допустимых значений.

### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Отдельные положения диссертации, в частности методики термополевых испытаний характеристики подзатворного диэлектрика используются при преподавании курса «Проектирование интегральных микросхем».

### **Публикации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах. В их числе 3 статьи в сборниках материалов на-

учных конференций и 1 тезис доклада на научных конференциях.

### **Структура и объем работы.**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 60 страниц. Работа содержит 3 таблицы, 10 рисунков. Библиографический список включает 53 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы термополевых испытаний, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведен краткий литературный обзор по тематике диссертации. Рассматриваются диагностических методов контроля качества и надежности полупроводниковых изделий, приводится их краткая классификация. Уделено внимание транзисторам на КМОП технологии. Физической основой работы полевого транзистора со структурой металл – диэлектрик – полупроводник является эффект поля. В полевых приборах со структурой МДП внешнее поле обусловлено напряжением приложенным на металлический электрод - затвор. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения присутствуют четыре состояния области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника - обогащение, обеднение, слабая и сильная инверсия. Полевые транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии, т.е. в том случае, когда образуется инверсионный канал между истоком и стоком.

Для контроля нестабильности зарядов диэлектрических слоев используются ускоренные режимы испытаний: повышенные по отношению к режимам эксплуатации величина электрического поля и температура проведения испытаний. Ускоренные режимы испытаний удобно оценивать по величине коэффициента ускорения миграции ионов в диэлектрике. Наиболее подходящей для этих целей является модель Эйринга, описание которой также дано в первой главе.

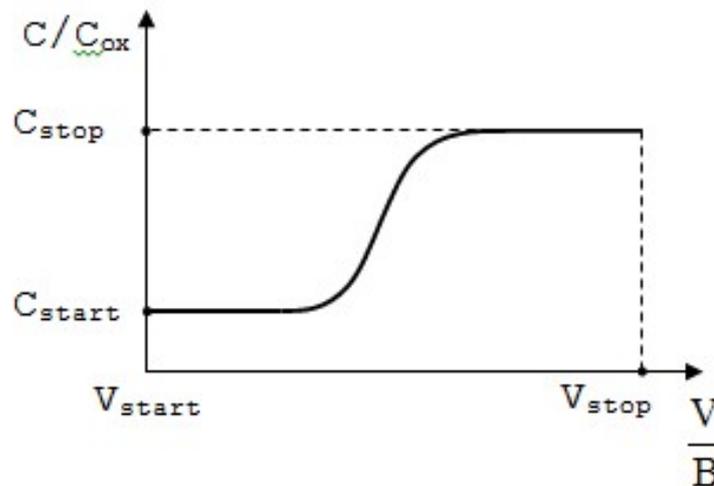
В качестве методик контроля ИМС приводятся методы вольт-фарадных и вольт-ёмкостных характеристик. Для проведения испытаний должны быть

выполнены определенные требования к средствам измерений и тестовым структурам. Контроль диэлектрических слоев на термополевую стабильность должен проводиться на рабочих пластинах перед операцией финишного контроля ИМС на пластине или на пластинах-спутниках со специальными тестовыми МОП структурами. В качестве таких ТС используются тестовый МОП-конденсатор или МОП-транзистор, располагаемые в тестовых модулях или на периферии рабочего кристалла.

**Во второй главе** приведена методология применения программного обеспечения на основе *Agilent VEE* для автоматизированных измерений и анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев. Разработанные алгоритмы программного обеспечения в среде *Agilent VEE* для автоматизированных измерений и анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев сведены в программу *HFALL*. Программа *HFALL* имеет сложную структуру, состоит из 5 основных подпрограмм: расчёт, инициализация, ввод данных, измерения и вывод данных.

Использование разработанного программного обеспечения позволяет существенно повысить точность измерения напряжения плоских зон. Погрешность измерений при использовании известного программного обеспечения на основе *IBASIC* составляет  $\pm(10 - 50)$  мВ, а при использовании разработанной программы не более  $\pm 1$  мВ.

Выполнение подпрограммы начинается с определения концентрации собственных носителей в кремнии  $N_i$ ,  $\text{см}^{-3}$ , далее рассчитывается минимальная ёмкость области пространственного заряда  $C_{smin}$ , пФ. Пример реализации приведен на рисунке 2.



**Рисунок 1 – Пример C-V характеристики для определения типа проводимости**

Таким образом, для ВФХ на рисунке 1:  $C_{start} < C_{stop}$ ,  $V_{start} < V_{stop}$ . Это n-тип проводимости.

Интерфейс пользователя программы *HFALL* обеспечивает удобную процедуру ввода данных, управления процессом автоматизированных изме-

рений, обработки данных и анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев. Разработанное программное обеспечение на основе *Agilent VEE* позволяет получить информацию о стабильности зарядовых характеристик диэлектрических слоев с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ и обеспечивает возможность анализа интегральных микросхем с проектными нормами до 0,18 мкм.

Теоретически обоснован и предложен экспрессный метод прогнозирования надежности МОП ИМС. В таком приближении изменение порогового напряжения, обусловленное дрейфом ионных примесей в диэлектрических слоях в процессе испытаний, можно описать величину сдвига порогового напряжения  $\Delta U_{п}$ , В, следующим соотношением:

$$\Delta U_{п} = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T}\right) \cdot t^n, \quad (1)$$

где  $B, n$  – постоянные коэффициенты;  
 $E_a$  – энергия активации процесса, эВ;  
 $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  
 $T$  – температура среды, К;  
 $t$  – время испытаний, ч.

Величины  $B, E_a$  и  $n$  являются постоянными только для локальной области на поверхности пластины (для одного фиксированного элемента МОП ИМС), а для совокупности элементов на поверхности пластины они описываются следующими функциями:

$$B = f(N, \Phi), \quad (2)$$

$$E_a = F(N, \Phi), \quad (3)$$

$$n = f'(N, \Phi), \quad (4)$$

где  $N$  – концентрация неконтролируемых ионных примесей,  $\text{см}^{-3}$ ;  
 $\Phi$  – фактор, учитывающий флуктуации параметров технологических операций.

В известных методах прогнозирования надежности, величины  $B, E_a$  и  $n$  полагаются постоянными, что приводит к существенной погрешности расчетной оценки надежности. В настоящей работе предложен новый способ определения численных значений коэффициентов, используемых при вычислении надежностных характеристик. В этом способе к тестовой структуре – МОП-конденсатору прикладывается напряжение, равное максимально допустимому напряжению на затворах транзисторов МОП ИМС, ТС нагревается до температуры  $T_1$ , К, в 1,1–1,7 раз большей максимально допустимой температуры  $T'$ , К, при эксплуатации ИМС и выдерживается в течение кон-

тролируемого времени  $t_1$ , ч, обеспечивающего изменение напряжения плоских зон, равно максимально допустимому дрейфу порогового напряжения ИМС. Далее температура повышается до значения  $T_2$ , К, в 1,01 – 1,2 раза превышающей температуру  $T_1$ , К, и МОП-конденсатор выдерживается при этой температуре в течение времени  $t_2$ , ч, обеспечивающего изменение напряжения плоских зон, равно допустимому дрейфу порогового напряжения ИМС. Характеристика надежности  $H$ , ч, определяемая как максимальное время работы МОП ИМС, в течение которого величина порогового напряжения не выходит за допустимые пределы, определяется следующим образом:

$$H = t_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^A, \quad (5)$$

где  $A$  - коэффициент, который определяется по формуле:

$$A = \frac{T_2 \cdot (T_1 - T')}{T' \cdot (T_2 - T_1)}. \quad (6)$$

В разработанном новом методе контролируется время  $t_1$  при температуре испытаний  $T_1$  и время  $t_2$  при температуре  $T_2$ , приводящие к фиксированному сдвигу напряжения плоских зон  $\Delta U_{nz}$  равному максимально допустимому дрейфу порогового напряжения в условиях эксплуатации интегральной схемы  $U_{z\ max}$ , т.е. при температуре  $T'$  и максимально допустимом напряжении на затворе:

$$\Delta U_{nz} = C = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T_1}\right) \cdot t_1^n = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T_2}\right) \cdot t_2^n = B \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T'}\right). \quad (7)$$

В результате преобразований соотношения (7):

$$H = t_1 \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{k \cdot n} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T'}\right)\right], \quad (8)$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp\left[-\frac{E_a}{k \cdot n} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right], \quad (9)$$

$$-\frac{E_a}{k \cdot n} = \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \frac{1}{1/T_2 - 1/T_1} \quad (10)$$

получаем:

$$H = t_1 \cdot \exp \left[ \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \cdot \frac{1/T_1 - 1/T'}{1/T_2 - 1/T_1} \right] = t_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^A \quad (11)$$

В выражении (11) величина  $A$  определяется только температурами испытаний  $T_1, T_2$  и максимально допустимой температурой эксплуатации схемы  $T'$ . Погрешность расчета прогнозируемых показателей надежности ИМС при использовании этого метода определяется только точностью контроля времени  $t_1$  и  $t_2$ . Выбор значений температур  $T_1, T_2$  получен на основании экспериментальных данных.

Экспериментальное опробование разработанного метода производилась на КМОП ИМС, изготовленной с поликремниевым затвором и подзатворным диэлектриком из двуокиси кремния толщиной 42.5 нм.

Прогнозирование надежности на основании выражения (2.11) и длительных вольт-температурных испытаний тестовых МОП-транзисторов из данной партии пластин показало удовлетворительное совпадение с величиной  $H$ , полученной из результатов экспериментов.

Оценим погрешность определения надежности в разработанном методе, для чего сначала прологарифмируем, а затем продифференцируем равенство (11):

$$\Delta H / H = \Delta t_1 / t_1 + A(\Delta t_1 / t_1 + \Delta t_2 / t_2) \quad (12)$$

Для рассматриваемого примера  $A=11.14$ . В таком случае погрешность контроля времени испытаний можно оценить из выражения:

$$\Delta H / H = \Delta t_1 / t_1 + A(\Delta t_1 / t_1 + \Delta t_2 / t_2) \quad (13)$$

Полученная величина погрешности свидетельствует о применимости предложенного метода оценки надежности в технологии изготовления ИМС

Таким образом, разработанный метод прогнозирования показателей надежности не требует проведения вспомогательных измерений, определения коэффициентов пересчета и т.д. Метод позволяет контролировать надежность ИМС в широком диапазоне изменения технологических факторов, а также проводить оценку показателя надежности по пластине и от партии к партии.

В **третьей главе** представлены результаты исследования термополевой стабильности ИМС.

Анализ термополевой стабильности диэлектрических слоев интегральных микросхем произведен на интегральных микросхемах с проектными нормами до 0.35 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика проанализированных микросхем находилась в диапазоне от 80 до 7 нм. Из приведенных

данных видно, что метод термополевой стабильности диэлектрических слоев интегральных микросхем является эффективным для оперативного выявления потенциально ненадежной продукции и поддержания технологического процесса изготовления микросхем на требуемом уровне.

Экспериментальные результаты контроля термополевой стабильности диэлектрических слоев показывают, что максимально наблюдаемые сдвиги  $\Delta V_{fb}$  после ТПИ составляют:

- для диэлектрика толщиной 7 нм величина  $\Delta V_{fb\_макс} = 3$  мВ;
- для диэлектрика толщиной 95 нм величина  $\Delta V_{fb\_макс} = 500$  мВ.

В соответствии с выражением (2), величина объемной концентрации подвижных ионных загрязнений в диэлектрических слоях  $N_{ion\_макс}$ , соответствующая этим максимальным сдвигам  $\Delta V_{fb\_макс}$  будет равна:

- для диэлектрика толщиной 7 нм величина  $N_{ion\_макс} = 1,3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>;
- для диэлектрика толщиной 95 нм величина  $N_{ion\_макс} = 1,2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Анализ полученных данных показывает, что в технологическом процессе ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» максимальный уровень подвижных ионных загрязнений в диэлектрических слоях не превышает величины  $N_{ion\_макс} = 1,3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При этом уровне ионных загрязнений величина сдвига напряжения плоских зон после ТПИ будет сильно зависеть от толщины подзатворного диэлектрика и при толщине диэлектрика 7 нм она составит всего 3 мВ, а при толщине 95 нм она будет на много больше и составит 500 мВ. Эти результаты свидетельствуют о том, что метод ТПИ целесообразно использовать лишь до некоторой граничной толщины подзатворного диэлектрика. При толщинах диэлектрика меньших этой граничной толщины метод ТПИ применять не целесообразно, т.к. даже при максимальных уровнях ионных загрязнений сдвиги напряжения плоских зон будут намного ниже допустимых значений.

Для установления граничной толщины подзатворного диэлектрика предположим, что максимально возможная величина уровня ионных загрязнений составляет  $N_{ion\_макс\_возм} = 5,0 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Тогда в соответствии с выражением (3.2), можно рассчитать максимально возможные сдвиги величины напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb\_макс\_возм}$  для подзатворных диэлектриков различной толщины. Максимально возможные сдвиги величины напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb\_макс\_возм}$  после ТПИ для подзатворных диэлектриков различной толщины при  $N_{ion\_макс\_возм} = 5,0 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> представлены в таблице.

Таблица 1 – Результаты испытаний

№ об- разца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D <sub>ох</sub> , нм	5	7	10	13	15	20	30	40	50	100
V <sub>fb</sub> , мВ	6	11,7	23,8	40,2	53,6	95,2	214	381	595	2380

Анализ данных таблицы показывает, что при толщинах подзатворного диэлектрика 10 нм и менее максимально возможные сдвиги величины на-

пряжения плоских зон не превышают 25 мВ и они по величине намного ниже допустимых значений.

В приложениях приведен акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны алгоритмы программного обеспечения на основе специального пакета программного обеспечения *Agilent VEE* для автоматизированных измерений, анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев субмикронных микросхем и представлены программой *HFALL*.

2. Использование разработанного программного обеспечения позволяет существенно повысить точность измерения напряжения плоских зон. Погрешность измерений при использовании известного программного обеспечения на основе *IBASIC* составляет  $\pm(10 - 50)$  мВ, а при использовании разработанной программы не более  $\pm 1$  мВ.

3. Разработанное программное обеспечение на основе *Agilent VEE* позволяет получить информацию о стабильности зарядовых характеристик диэлектрических слоев с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ и обеспечивает возможность анализа интегральных микросхем с проектными нормами до 0,18 мкм.

4. Проведен анализ термополевой стабильности диэлектрических слоев интегральных микросхем с проектными нормами до 0.35 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика проанализированных микросхем находилась в диапазоне от 7 до 95 нм.

5. Подзатворный диэлектрик обладает требуемым уровнем стабильности, объемная концентрация подвижных ионных загрязнений в диэлектрике не превышает  $N_{ion\_max} = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

6. Метод термополевой стабильности диэлектрических слоев интегральных микросхем является эффективным для оперативного выявления потенциально ненадежной продукции и поддержания технологического процесса изготовления микросхем на требуемом уровне.

7. Установлена граничная толщина подзатворного диэлектрика величиной 10 нм. При толщинах диэлектрика меньших этой граничной толщины метод ТПИ применять не целесообразно, т.к. даже при максимальных уровнях ионных загрязнений сдвиги напряжения плоских зон будут намного ниже допустимых значений.

### Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи в журналах*

1. Провалов, Е.В. Термополевая стабильность  $p$ -МОП-транзисторов КМОП ИМС / Провалов Е.В., Чигирь Г.Г. // Международный научно-практический журнал «Современные исследования». – Том №10, №3 (2018) – С. 14-18.

2. Провалов, Е.В. Программное обеспечение на основе *Agilent VEE* для автоматизированных измерений и анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев / Провалов Е.В., Чигирь Г.Г. // IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники - 2018» (ИТЭР 2018). – С. 67-71.

3. Провалов, Е.В. Термополевые испытания  $p$ -МОП-транзисторов КМОП ИМС с проеными нормами 0,35 мкм / Провалов Е.В., Чигирь Г.Г. // LXI Международная (заочная) научно-практическая конференция по всем наукам «Теория и практика мирового научного знания в XXI веке» (М61). – С. 96-98.

### *Тезисы конференций*

4. Провалов Е.В. Термополевые испытания  $p$ -МОП-транзисторов КМОП ИМС с проеными нормами 0,35 мкм / Провалов Е.В., Чигирь Г.Г. // IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники - 2018» (ИТЭР 2018). – С. 81-83.

## РЕЗЮМЕ

Провалов Егор Васильевич

### Исследование термополевой стабильности тонких диэлектрических слоев

**Ключевые слова:** интегральные микросхемы, термополевые испытания, ускоренные испытания

**Цель работы:** разработка методик проведения термополевых испытаний ИМС с проектными нормами до 0,18 мкм и проведение ускоренных испытаний *p*-МОП транзисторов серийно выпускаемых КМОП микросхем.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны алгоритмы программного обеспечения на основе специального пакета программного обеспечения *Agilent VEE* для автоматизированных измерений, анализа зарядовых характеристик диэлектрических слоев субмикронных микросхем и представлены программой *HFALL*. Разработанное программное обеспечение на основе *Agilent VEE* позволяет получить информацию о стабильности зарядовых характеристик диэлектрических слоев с погрешностью не более  $\pm 1$  мВ и обеспечивает возможность анализа интегральных микросхем с проектными нормами до 0,18 мкм.

Проведен анализ термополевой стабильности диэлектрических слоев интегральных микросхем с проектными нормами до 0,35 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика проанализированных микросхем находилась в диапазоне от 7 до 95 нм. Подзатворный диэлектрик обладает требуемым уровнем стабильности, объемная концентрация подвижных ионных загрязнений в диэлектрике не превышает  $N_{ion\_max} = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Установлена граничная толщина подзатворного диэлектрика величиной 10 нм. При толщинах диэлектрика меньших этой граничной толщины метод ТПИ применять не целесообразно, т.к. даже при максимальных уровнях ионных загрязнений сдвиги напряжения плоских зон будут намного ниже допустимых значений.

**Степень использования:** результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

**Область применения:** микроэлектроника, технологии проектирования электронных систем.

## РЭЗІЮМЭ

### Правалаў Ягор Васільевіч

#### Даследаванне тэрмапалявой стабільнасці тонкіх дыэлектрычных слаёў

**Ключавыя словы:** інтэгральныя мікрасхемы, тэрмапалявыя выпрабаванні, паскораныя выпрабаванні.

**Мэта працы:** распрацоўка методык правядзення тэрмапалявых выпрабаванняў ІМС з практнымі нормамаі да 0,18 мкм і правядзенне паскораных выпрабаванняў *p*-МОП транзістараў серыйна якія выпускаюцца КМОП мікрасхем.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Распрацаваны алгарытмы праграмнага забеспячэння на аснове спецыяльнага пакета праграмнага забеспячэння *Agilent VEE* для аўтаматызаваных вымярэнняў, аналізу зарадавых характарыстык дыэлектрычных слаёў субмікронных мікрасхем і прадстаўлены праграмай *HFALL*. Распрацаванае праграмнае забеспячэнне на аснове *Agilent VEE* дазваляе атрымаць інфармацыю пра стабільнасць зарадавых характарыстык дыэлектрычных слаёў з хібнасцю не больш  $\pm 1$  мВ і забяспечвае магчымасць аналізу інтэгральных мікрасхем з практнымі нормамаі да 0,18 мкм.

Праведзены аналіз тэрмапалявой стабільнасці дыэлектрычных слаёў інтэгральных мікрасхем з практнымі нормамаі да 0.35 мкм. Таўшчыня подзатворнага дыэлектрыка прааналізаваных мікрасхем знаходзілася ў дыяпазоне ад 7 да 95 нм. Подзатворнага дыэлектрык валодае патрэбным узроўнем стабільнасці, аб'ёмная канцэнтрацыя рухомах іённых забруджванняў у дыэлектрыку не перавышае  $N_{\text{іон\_макс}} = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Ўсталяваная межавая таўшчыня подзатворнага дыэлектрыка велічнай 10 нм. Пры таўшчынях дыэлектрыка меншых гэтай межавай таўшчыні метада ТПІ прымяняць не мэтазгодна, бо нават пры максімальных узроўнях іённых забруджванняў зрухі напружання плоскіх зон будуць нашмат ніжэй дапушчальных значэнняў.

**Ступень выкарыстання:** Атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў рамках вучэбнай дысцыпліны «Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў».

**Вобласць прымянення:** мікраэлектроніка, тэхналогіі праектавання электронных сістэм.

## SUMMARY

Provalov Egor Vasil'evich

### Investigation of the thermal field stability of thin dielectric layers

**Keywords:** integrated circuits, thermal field tests, accelerated tests.

**The object of study:** development of methods for conducting thermal-field tests of IMS with design standards up to 0.18  $\mu\text{m}$  and accelerated testing of the *p*-MOS transistors of commercially available CMOS microcircuits.

**The results and novelty:** Software algorithms are developed on the basis of a special software package *Agilent VEE* for automated measurements, analysis of charge characteristics of dielectric layers of submicron microcircuits and are represented by the *HFALL* program. The developed software based on *Agilent VEE* provides information on the stability of the charge characteristics of dielectric layers with an error of not more than  $\pm 1$  mV and provides the possibility of analyzing integrated circuits with design standards up to 0.18  $\mu\text{m}$ .

The analysis of the thermal field stability of dielectric layers of integrated microcircuits with design standards up to 0.35 microns is carried out. The thickness of the gate dielectric of the analyzed microcircuits was in the range from 7 to 95 nm. The gate insulator possesses the required level of stability, the volume concentration of mobile ionic impurities in the dielectric does not exceed  $N_{ion\_max} = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

The boundary thickness of the gate insulator of 10 nm is established. At thicknesses of a dielectric smaller than this boundary thickness, the TPI method is not expedient to apply, since even at maximum levels of ionic contamination, the flat-zone voltage shifts will be much lower than the allowable values.

**Degree of use:** The results are implemented in the educational process at the Department of Design of Information and Computer Systems of the Educational Establishment «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» within the framework of the educational discipline «Physical basis of designing of radio-electronic means».

**Sphere of application:** microelectronics, technology of designing electronic systems.