



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1(177) 2020

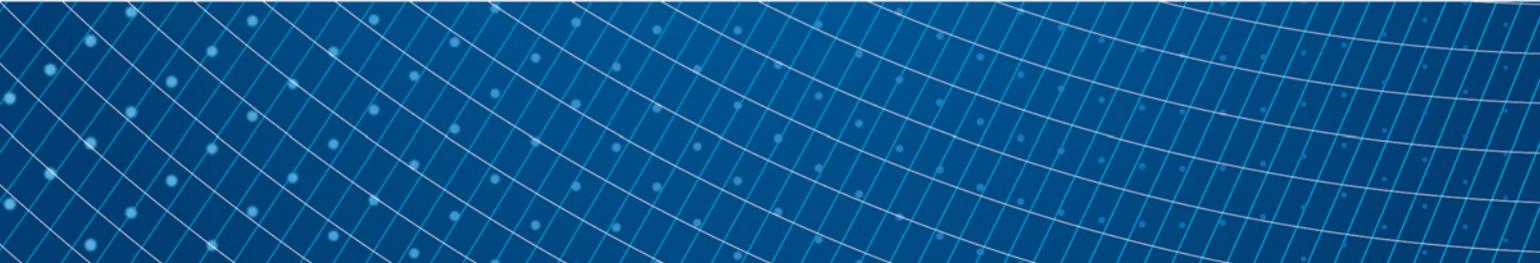
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 1(177) 2020

Москва, 2020



«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.**Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Г. Я.**, д. т. н.,
академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев А. Л.**, д. ф.-м. н.,
академик РАН**Бетелин В. Б.**, д. ф.-м. н.,
академик РАН**Бокарев В. П.**, к. х. н.,
ответственный секретарь**Бугаев А. С.**, д. ф.-м. н.,
академик РАН**Быков В. А.**, д. т. н.**Галиев Г. Б.**, д. ф.-м. н.**Горбачевич А. А.** д. ф.-м. н.,
академик РАН**Горнев Е. С.**, д. т. н.,
член-корреспондент РАН,
зам. главного редактора**Грибов Б. Г.**, д. х. н.,
член-корреспондент РАН**Зайцев Н. А.**, д. т. н.**Ким А. К.**, к. т. н.**Критенко М. И.**, к. т. н.**Петричкович Я. Я.**, д. т. н.**Сигов А. С.**, д. ф.-м. н.,
академик РАН**Стемпковский А. Л.**, д. т. н.,
академик РАН**Чаплыгин Ю. А.**, д. т. н.,
академик РАН**Шелепин Н. А.**, д. т. н.,
зам. главного редактора**Эннс В. И.**, к. т. н.**Адрес редакции**124460 г. Москва, Зеленоград,
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

УчредительАО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»**Слово редактора** 4**Разработка и конструирование****Д.А. Лагаев, Н.А. Шелепин**Конструктивно-технологические особенности КМОП
КНИ-транзисторов с повышенной стойкостью к накопленной дозе
ионизирующего излучения 5**В.М. Долгополов, В.В. Одинокоев, П.А. Иракин,****В.М. Варакин, С.В. Моргун, И.А. Усов**Исследование технологии и разработка оборудования
для низкотемпературного плазмохимического осаждения
диэлектрических слоев с источником высокоплотной плазмы
ICPCVD на пластины диаметром до 300 мм 14**Процессы и технология****В.Ю. Васильев**Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния
для микро- и нанoeлектроники.
Часть 3. Процессы с азотсодержащими предшественниками 19**В.Ю. Васильев**Атомно-слоевое осаждение тонких слоев нитрида кремния
для микро- и нанoeлектроники 31**Свойства материалов****Г.Я. Красников, О.М. Орлов, В.В. Макеев**Исследование эффекта переключения и транспорта заряда
в бесформовочном мемристоре на основе нитрида кремния
с разными типами металла верхнего электрода 42**Математическое моделирование****В.Л. Евдокимов**Моделирование топологической неравномерности слоев,
осаждаемых из газовой фазы на микрорельефную подложку 47**В.В. Бардушкин, Ю.И. Шиляева, А.А. Кочетыгов, А.А. Дронов**Концентрация напряжений в мезопористых структурах на основе
кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233–273 К 54**В.В. Благодатов**

Электромагнитный анализ криптографических микросхем 60

Надежность**Н.С. Данилин, Д.М. Димитров, И.Ю. Булаев**Проблема выпуска качественных микросхем
для отечественной микроэлектроники 63**Аннотации** 67

**“ELECTRONIC ENGINEERING.
Series 3.
MICROELECTRONICS”**

**Editorial Council
Chief Editor**

G.Ya. Krasnikov, Sc. D.,
Full Member of the RAS

The Members of Editorial Council

Aseev A. L., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Betelin V. B., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Bokarev V. P., Ph.D.,
Responsible Secretary

Bugaev A. S., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

Gorbatsevich A. A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Gornev E. S., Sc. D.,
Corresponding Member of the RAS
Deputy Chief Editor

Gribov B. G., Sc. D.,
Corresponding Member of the RAS

Zaitsev N. A., Sc. D.

Kim A. K., Ph.D.

Kritenko M. I., Ph.D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.

Sigov A. S., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Stempkovskiy A. L., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Chaplygin Yu.A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Shelepin N. A., Sc. D.,
Deputy Chief Editor

Enns V.I., Ph.D.

Editorial Staff Address

📍 1-st Zapadnyy pr-d 12, str. 1.,
Zelenograd, Moscow,
124460, Russian Federation

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru
www.niime.ru/
zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research
Institute” Stock Company

Editor’s Column 4

Development and Designing

D.A. Lagaev, N.A. Shelepin

SOI CMOS transistors with increased hardening to total dose radiation:
technology and design 5

**V.M. Dolgoplov, V.V. Odinkov, P.A. Iraquin,
V.M. Varakin, S.V. Morgun, I.A. Usov**

Technology research and development of equipment for low-
temperature plasma-chemical deposition of dielectric layers with
a high-density plasma source ICPCVD on plates with a diameter
of up to 300 mm 14

Processes and Technology

V.Yu. Vasilyev

Atomic layer deposition of silicon dioxide thin films
for micro- and nanoelectronics.
Part 3. Processes with nitrogen-containing precursors 19

V.Yu. Vasilyev

Atomic layer deposition of silicon dioxide thin films for micro-
and nanoelectronics 31

Properties of Materials

G.Ya. Krasnikov, O.M. Orlov, V.V. Makeev

Research of the switching effect and charge transport
in the forming-free memristor based on silicon nitride with various
types of top electrode metal 42

Mathematical Simulation

V.L. Evdokimov

Modeling the topological nonuniformity of the layers deposited
from the gas phase on a substrate microrelief 47

V.V. Bardushkin, Yu.I. Shilyaeva, A.A. Kochetygov, A.A. Dronov

Stress concentration in mesoporous silicon-based structures
with adsorbed water in the temperature range 233–273 K 54

V.V. Blagodatov

SCA improved by clustering and PCA 60

Reliability

N.S. Danilin, D.M. Dimitrov, I. Yu. Bulaev

The high-quality microcircuits for Russian microelectronics production
problem 63

Abstracts 67

The journal has included in the number of publications recommended
for publication of articles by applicants for academic degrees of candidate
and doctor of Sciences №1969 by the all-Russian attestation Commission (НАС)

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 177-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

Наш журнал постоянно представляет результаты новых разработок технологии и изделий микроэлектроники и делится опытом многолетнего изучения возникающих при этом проблем.

В данном номере сделан акцент на таких ключевых разделах, как «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Свойства материалов», «Математическое моделирование» и «Надежность».

Выпуск очередного номера журнала представлен девятью оригинальными статьями, посвященными результатам актуальных научных исследований.

Номер открывается разделом «Разработка и конструирование», в котором рассмотрены методы повышения стойкости интегральных микросхем к ионизирующему излучению, реализованные на базе КНИ КМОП-технологии, дается описание основных эффектов, возникающих в КНИ КМОП-транзисторах при взаимодействии с ионизирующим излучением, анализируются перспективы развития изделий микроэлектроники с повышенной стойкостью к внешним воздействиям в условиях постоянного уменьшения проектных норм. Также в данном разделе представлена работа по разработке технологии и оборудования для низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектрических слоев на пластинах диаметром до 300 мм.

В разделе «Процессы и технология» представлена третья часть обзора по результатам исследования процессов атомно-слоевого осаждения диоксида кремния, посвященная процессам с азотсодержащими предшественниками. В продолжение данной темы рассмотрен процесс атомно-слоевого осаждения нитрида кремния.

В разделе «Свойства материалов» приведено экспериментальное исследование эффекта переключения и переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния при использовании разных типов металла верхнего электрода.



В следующем разделе «Математическое моделирование» представлена модель формирования профиля канавочных и гребенчатых структур при изготовлении кристаллов субмикронных интегральных схем и приведены аналитические выражения и оценки профилей для одиночной канавки и регулярной рельефной структуры, учитывающие эффект загрузки и геометрический фактор доставки реагента. В этом же разделе приведена теоретическая модель прогнозирования значений компонента тензора концентрации напряжений в мезопористых структурах на основе кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233–273 К и проведены численные модельные расчеты по зависимости значений компонент указанного тензора от объемного содержания воды в матрице пористого кремния. В третьей статье раздела продемонстрированы возможности электромагнитного анализа криптографических микросхем с применением комбинации методов машинного обучения – PCA и кластеризации.

В заключительном разделе «Надежность» рассмотрена проблема производства отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре и возможные пути ее решения на основе технологии «система в корпусе».

От имени редакции я благодарю всех наших авторов и читателей, партнеров и друзей за интерес к изданию, поддержку и сотрудничество.

*С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН,*

Г.Я. Красников

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КМОП КНИ-ТРАНЗИСТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К НАКОПЛЕННОЙ ДОЗЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

► Д.А. Лагаев^{1,2}, Н.А. Шелепин^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

² НИУ «МИЭТ»

В работе рассмотрены методы повышения стойкости интегральных микросхем к ионизирующему излучению, реализованных на базе КНИ КМОП технологии. Дается описание основных эффектов, возникающих в КНИ КМОП-транзисторах при взаимодействии с ионизирующим излучением космического пространства. Представлен ряд приемов, позволяющих повысить радиационную стойкость ИМС на базе КНИ КМОП технологии. Анализируются перспективы развития изделий микроэлектроники с повышенной стойкостью к внешним воздействиям в условиях постоянного уменьшения проектных норм.

SOI CMOS TRANSISTORS WITH INCREASED HARDENING TO TOTAL DOSE RADIATION: TECHNOLOGY AND DESIGN

Dmitriy A. Lagaev^{1,2}, Nikolay A. Shelepin^{1,2}

¹ «MERI», SC

² MIET

The paper discusses methods for increasing the tolerance of integrated circuits to ionizing radiation, implemented based on SOI CMOS technologies. The main effects in SOI CMOS transistors resulting from IC interaction with space ionizing radiation are considered. Some techniques are presented, which increasing the radiation tolerance of ICs based on SOI CMOS technology. The prospects for the development of microelectronics products with increased tolerance to total dose radiation in the conditions of constant scaling of the process node are analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении более 30 лет КНИ технология активно применяется компаниями Synova, Honeywell, Lincoln Lab и многими другими для проектирования интегральных микросхем (ИМС) космического и специального назначения. Переход на КНИ технологию продиктован существенными преимуществами последней: снижение размеров активных областей транзистора, увеличение производительности и полной диэлектрической изоляцией отдельного транзистора [1,2]. Существенным недостатком коммерческой КНИ КМОП технологии является снижение стойкости n-канальных тран-

зисторов к накопленной дозе, что связано с наличием в структуре транзистора скрытого оксида, способного накапливать дополнительный положительный заряд в приповерхностной области [3,4]. В связи с этим возрастает роль исследовательских работ в области разработки ИМС, реализованных на основе КНИ КМОП технологии с повышенной стойкостью к накопленной дозе.

В настоящее время существует множество работ, описывающих процессы накопления радиационно-индуцированного заряда в ИМС [5-7]. В общем случае принято выделять два основных механизма,

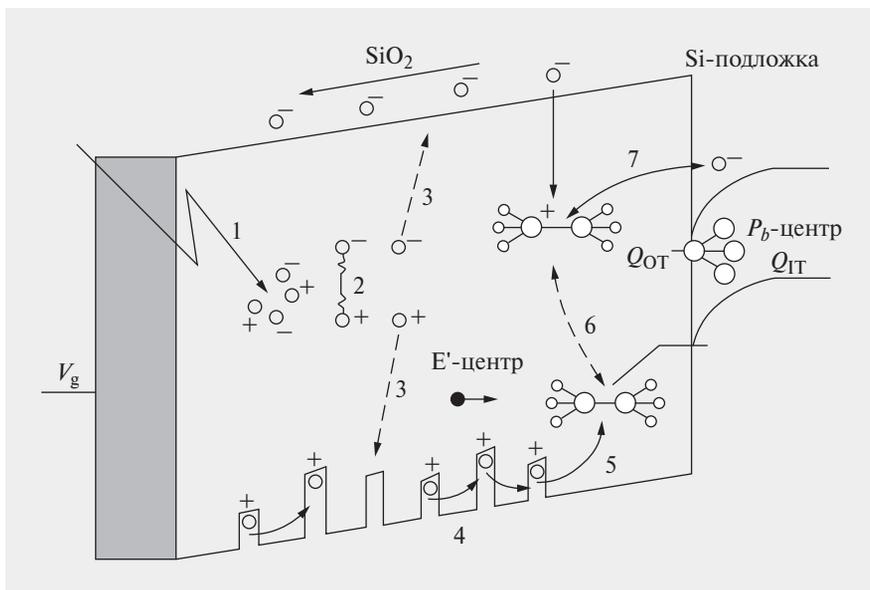


Рис. 1. Зонная диаграмма МОП-конденсатора, иллюстрирующая процессы генерации заряда в диэлектрике при взаимодействии с ионизирующим излучением [5].

объясняющих природу накопленного заряда. Первый механизм, представленный на рис. 1, отвечает за накопление положительного заряда на глубоких ловушечных уровнях в объеме диэлектрика, называемых E'-центрами. Второй механизм описывает захват носителей заряда на границе раздела материалов Si/SiO₂. В настоящее время нет единой теории, которая бы досконально описывала физику процесса, предшествующую накоплению заряда на поверхностных состояниях. Согласно наиболее популярной водородной модели считается, что формирование поверхностных состояний вызвано движением ионов водорода к границе раздела Si/SiO₂ с последующей депассивацией

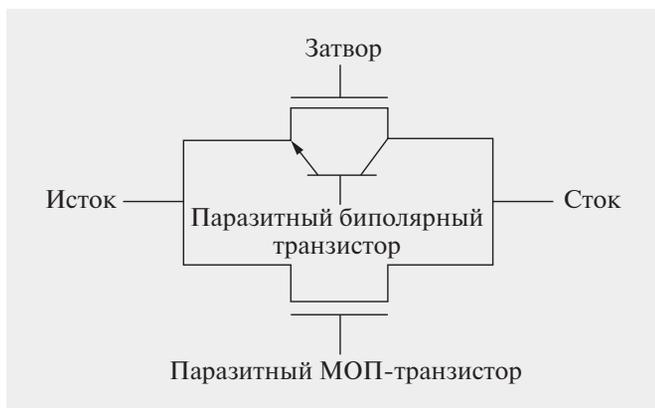


Рис. 2. Схематическое изображение n-канального КНИ транзистора с дополнительными паразитными элементами.

поверхностных дефектов, являющихся центрами захвата заряда [8].

В качестве основных методов повышения стойкости схем, реализованных по КМОП КНИ технологии, принято выделять: технологические методы - RHbP (Radiation Hardening by Process) и конструктивно-топологические - RHbD (Radiation Hardening by Design). Отсутствие необходимости в изменении базового технологического маршрута привело к преобладанию RHbD-решений в области проектирования радиационно-стойких ИМС. Несмотря на это, наиболее существенных результатов по стойкости к накопленной дозе удается достичь посредством интеграции в производство RHbP-методов. Широкое распространение при проектировании радиационно-стойких ИМС на базе КНИ технологии получили транзисторы со структурой А и Н-типа, которые могут считаться классическим примером реализации RHbD-методов [9].

Далее в работе детально раскрываются эффекты, возникающие в отдельных КНИ-транзисторах, при взаимодействии ИМС с ионизирующим излучением космического пространства и методы, используемые для повышения стойкости к накопленной дозе.

Эффекты, индуцируемые накопленной дозой, в КНИ КМОП-транзисторах

ЭФФЕКТЫ, ИНДУЦИРУЕМЫЕ НАКОПЛЕННОЙ ДОЗОЙ, В КНИ КМОП-ТРАНЗИСТОРАХ

В настоящее время основной технологией, применяемой для производства современных ИМС космического и специального назначения, к которым предъявляются повышенные требования по надежности и стойкости к внешним воздействиям, выступает КНИ КМОП технология. В рамках данной технологии возможно изготовление частично и полностью обедненных транзисторов, основным отличием которых является различная глубина области пространственного заряда в пленке кремния, что, в конечном итоге, является важным фактором при анализе эффектов, связанных с влиянием накопленного заряда на деградацию электрических характеристик прибора. В общем случае структуру КНИ-транзистора, вне зависимости от его вида, можно представить в виде основного и двух дополнительных паразитных транзисторов, как представлено на рис. 2.

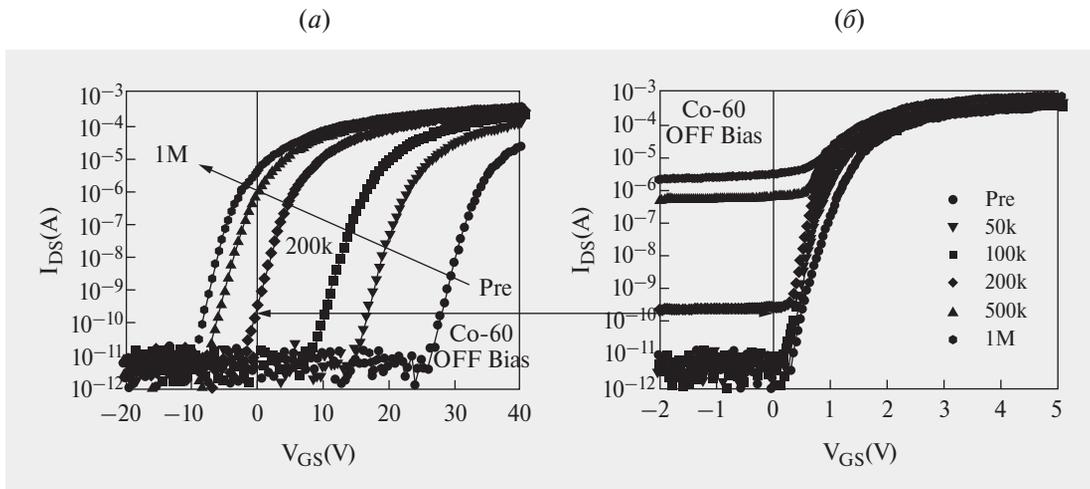


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики:
 а) донного МОП-транзистора
 б) основного МОП-транзистора, с учетом влияния паразитного транзистора.
 Облучение транзистора осуществлялось в закрытом состоянии ($V_{gs} = V_s = 0$, $V_{ds} = 5$ В) [10].

Введение в схему паразитного МОП-транзистора обусловлено наличием положительного заряда в структуре диэлектрика, что при некотором критическом заряде приводит к отпиранию донного транзистора, тем самым формируя дополнительные пути для протекания токов утечки. В качестве затвора паразитного МОП-транзистора выступает несущая подложка, на которую, в общем случае, может быть подан любой потенциал. На рис. 3а представлена зависимость тока паразитного транзистора от потенциала на подложке для различных доз ионизирующего излучения. Соответственно даже при нулевом потенциале, что является наиболее часто встречающимся на практике случаем, генерация заряда в скрытом оксиде приводит к возникновению существенных токов утечки. Представленные на рис. 3б характеристики однозначно показывают, что величины токов утечки могут в значительной мере ограничивать применимость ИМС, работающих в условиях космического пространства.

Наличие паразитного биполярного транзистора объясняется необходимостью учета эффекта плавающего тела, который свойственен частично обедненным транзисторам. Природа данного эффекта состоит в генерации избыточного заряда на переходе сток/пленка кремния в результате ударной ионизации при высоких величинах электрических полей. В случае функционирования ИМС в условиях космического пространства к неравновесным носителям заряда, возникшим в результате ударной ионизации, добавляются радиационно-инду-

цированные носители, которые приводят к усугублению данного эффекта. На ВАХ, показанных на рис. 4, данный эффект проявляется в виде резкого, практически ступенчатого, увеличения тока при высоком потенциале на стоке.

В случае полностью обедненного транзистора накопление положительного заряда в скрытом оксиде имеет некоторые особенности, которые обусловлены электрической связью паразитного ПДП (полупроводник-диэлектрик-полупроводник) и основ-

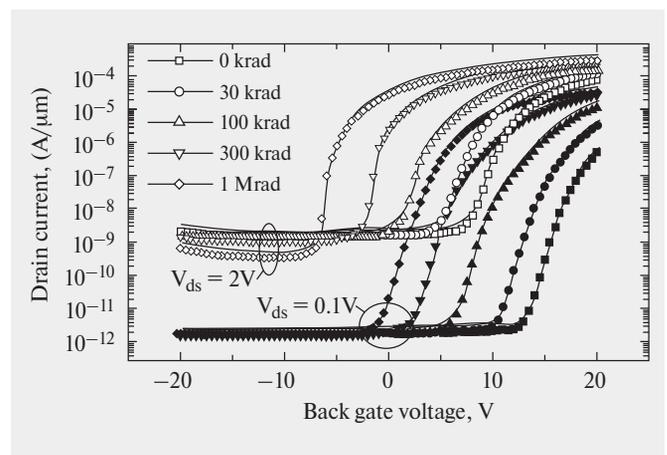


Рис. 4. ВАХ тока стока (I_d) от напряжения на подложке (V_b) для различной дозы ионизирующего излучения п-канального частично обедненного КНИ транзистора. Потенциал на затворе равен 0 ($V_g = 0$), напряжение на стоке – 0,1 В (закрашенные символы) и 2 В (открытые символы). Облучение осуществлялось при потенциале на стоке, равным 2 В, другие клеммы заземлены [11].

ного МОП-транзистора. Обнаружено, что изменение порогового напряжения основного транзистора пропорционально сдвигу порогового напряжения паразитного транзистора, что выражается в виде коэффициента электрической связи k [12]:

$$k = \frac{C_{Si} C_{box}}{C_{top} (C_{Si} + C_{box})}, \quad (1)$$

$$\Delta V_{topgate} = k \Delta V_{backgate}, \quad (2)$$

где C_{Si} , C_{box} и C_{top} – емкости канала в кремнии, скрытого и подзатворного оксида. Так как технология изготовления полностью обедненных КНИ транзисторов не предполагает использование кармана, заряд, накопленный в скрытом оксиде, приводит к существенному сдвигу порогового напряжения донного транзистора, тем самым влияя на свойства основного транзистора. Помимо этого, из формулы (1) явно вытекает, что уменьшение толщины скрытого оксида, также может приводить к ухудшению стойкости КНИ-транзисторов к накопленной дозе (рис. 5), тем самым лишая разработчиков возможности снизить величину положительного заряда посредством утонения скрытого оксида.

В случае использования достаточно тонкого подзатворного диэлектрика, вне зависимости от типа транзистора может наблюдаться RILC-эффект (Radiation-Induced Leakage Current). Суть данного эффекта заключается в увеличении тока утечки через подзатворный диэлектрик под действием

ионизирующего излучения. Предположительно, описанный ток утечки связан с деградацией свойств оксида, что выражается в увеличении числа ловушек в его объеме, которые выступая в качестве центров захвата заряда, существенно облегчают процесс туннелирования носителей в электрод затвора [13].

Наличие поверхностных состояний также приводит к деградации электрических характеристик как объемных, так и КНИ транзисторов, что выражается в снижении подвижности носителей заряда из-за рассеяния в приповерхностной области полупроводника и захвата заряда на поверхностные состояния. В связи с тем, что поверхностные состояния концентрируются вблизи границы раздела Si/SiO₂, считается, что потенциальный барьер для носителей заряда отсутствует. Отсутствие потенциального барьера приводит к постоянной перезарядке поверхностных состояний в зависимости от приложенного электрического поля и условий отжига, тем самым влияя на величину порогового напряжения [14].

МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ К НАКОПЛЕННОЙ ДОЗЕ

Как отмечено ранее, поверхностные радиационные эффекты оказывают серьезное влияние на параметры интегральных схем, что может приводить к параметрическим и функциональным отказам. В связи с этим проектировщиками разработаны ряд приемов, направленных на повышение стойкости ИМС к накопленной дозе. Успешность применения того или иного метода во многом зависит от качества используемых пластин. По этой причине, прежде чем приступить к выполнению дорогостоящих технологических операций маршрута изготовления ИМС, требуется проводить тщательный анализ параметров исходных пластин с целью дальнейшего предотвращения неконтролируемого разброса электрических параметров у готового изделия.

Технологические методы повышения стойкости к накопленной дозе

Сравнение объемной и КНИ технологии показывает, что помимо подзатворного и изоляционного оксида, активно применяемых в обоих вариантах транзисторных структур, КНИ технология предполагает наличие скрытого оксида, который, в общем случае, участвует в формировании дополнительных путей для токов утечки. В связи с этим важным фактором, способствующим повышению стойкости ИМС, реализованных на основе КНИ

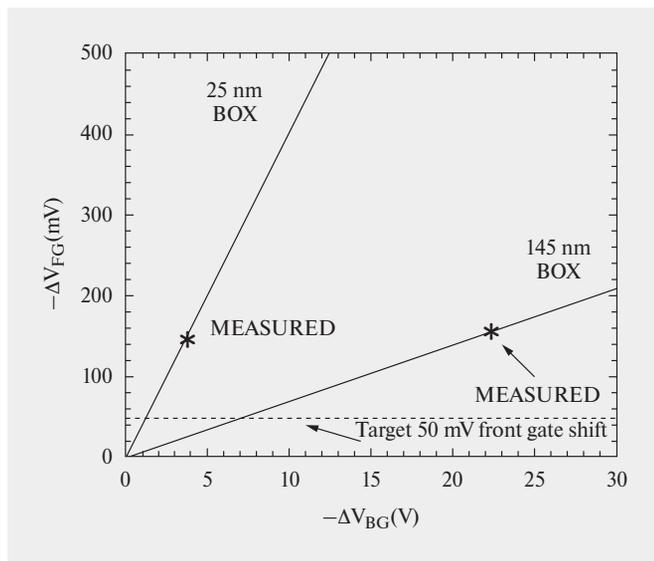


Рис. 5. Зависимость сдвига порогового напряжения основного транзистора от сдвига порогового напряжения донного транзистора для различной толщины скрытого оксида [12].

технологии, является формирование радиационно-стойкого скрытого оксида. В качестве основных приемов, позволяющих улучшить характеристики скрытого оксида к накопленной дозе можно выделить:

1) Применение многостадийной имплантации кислорода на этапе формирования скрытого оксида SIMOX-методом (Separation by Implantation of Oxygen), что позволяет компенсировать потерю кислорода в результате диффузии последнего из оксида на этапах высокотемпературного отжига, тем самым повысив кристаллическую однородность формируемого оксида [15].

2) Внедрение ловушек в структуру скрытого оксида путем имплантации акцепторной примеси: кремния, алюминия, германия, бора и азота. Таким образом, удается скомпенсировать положительный заряд, накопленный в структуре диэлектрика, путем введения электронных ловушек [16–17].

В табл. 1 представлено сравнение электрических характеристик скрытых оксидов, сформированных по SIMOX и BESOI (Bonded and Etched-Back Silicon-On-Insulator) технологии. Анализ результатов показывает, что использование методик по оптимизации параметров оксида к накопленной дозе позволяет влиять на плотность ловушек, тем самым повышая уровень стойкости вне зависимости от технологии получения скрытого оксида.

Таблица 1. Влияние технологии формирования на электрические параметры скрытого оксида

Технология формирования оксида	Толщина оксида, T_{ox} нм	Плотность ловушек, N_{th} см ⁻²
SIMOX [18]	400	$(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{13}$
Hardened SIMOX [19]	370	$1,08 \cdot 10^{12}$
BESOI [20]	400	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{13}$
Hardened BESOI [21]	400	$5 \cdot 10^{12}$

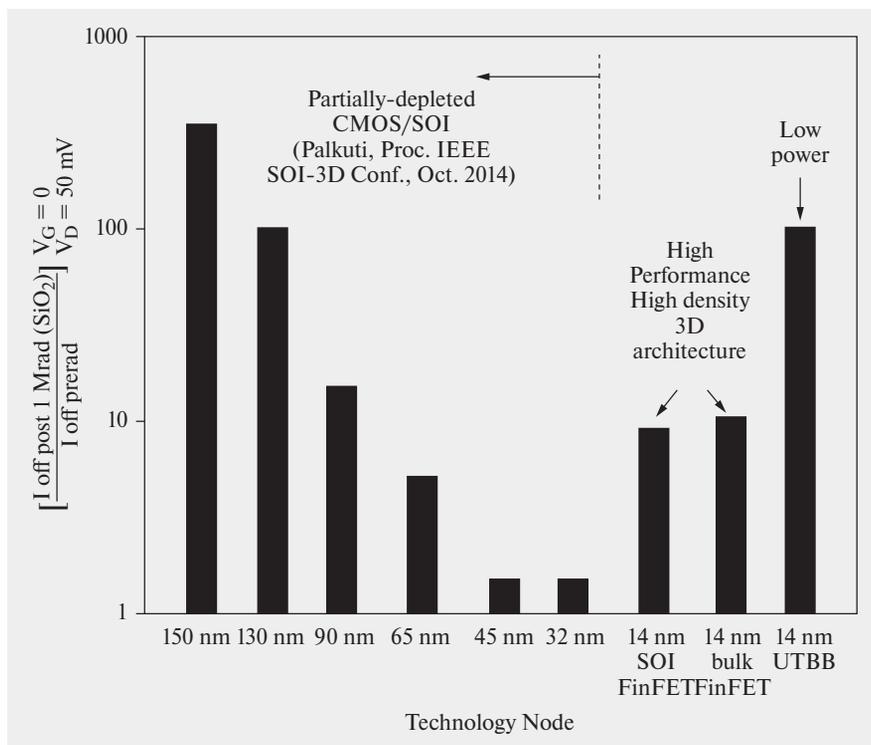


Рис. 6. Зависимость относительной величины тока утечки от проектной нормы транзистора при накопленной дозе в 1 Мрад [12].

Одним из наиболее перспективных методов, направленных на повышение стойкости КМОП КНИ ИС к ионизирующему излучению космического пространства, является снижение проектных норм. Подробное описание основных принципов масштабирования представлено в работе [22]. Действительно, использование масштабирования позволяет добиваться повышенной стойкости к накопленной дозе за счет утонения подзатворного диэлектрика, снижения рабочего напряжения и повышения концентрации легирующей примеси в кармане. Несмотря на кажущуюся универсальность, применение данного метода, как следует из рис. 6, ограничивается проектными нормами в 32 нм, что объясняется необходимостью использования полностью обедненных КНИ КМОП структур при дальнейшем масштабировании, тем самым увеличивая влияние захваченного заряда в скрытом диэлектрике на параметры основного транзистора. Стоит отметить, что для объемного варианта исполнения структуры типа FinFET, с проектными нормами 14 нм, также наблюдается снижение стойкости к накопленной дозе. Предположительно данное явление связано с генерацией дополнительных носителей заряда в объеме транзистора, которые приводят к увеличению токов утечки.

Конструктивные методы повышения стойкости к накопленной дозе

Широкое распространение при проектировании радиационно-стойких КНИ КМОП ИС получили транзисторы со структурой Н- и А-типа (рис. 7). В отличие от стандартных коммерческих решений, использование транзисторов Н- и А-типа позволяет бороться с боковыми токами утечки посредством оптимизации геометрии затвора и использования р+ охранных областей соответственно. Подавление эффекта плавающего тела в представленных структурах реализуется посредством использования контакта к карману, что в общем случае приводит к увеличению площади ИС. В связи с этим актуальной задачей является выбор оптимального расположения контактов к карману для эффективного собирания сгенерированного космическим излучением заряда при минимальном увеличении площади итогового изделия. Исходя из сказанного, использование структур А-типа является целесообразным для схем, к которым предъявляются повышенные требования к занимаемой площади ИМС, в то время как структуры Н-типа являются универсальным решением для случаев, когда требуется симметричность активных областей и возможность подачи независимых потенциалов на контакт кармана [9].

Предложенная группой исследователей из лаборатории Sandia структура BUSFET (Body Under Source FET), представленная на рис. 8, также позволяет реализовывать радиационно-стойкие КНИ КМОП ИС [23]. Повышенная стойкость структуры BUSFET обеспечивается за счет различной глубины формирования сток/истоковых областей прибора, что исключает протекание токов утечки по поверхности скрытого оксида. Стоит отметить, что широкого распространения данная структура не получила, что объясняется рядом недостатков:

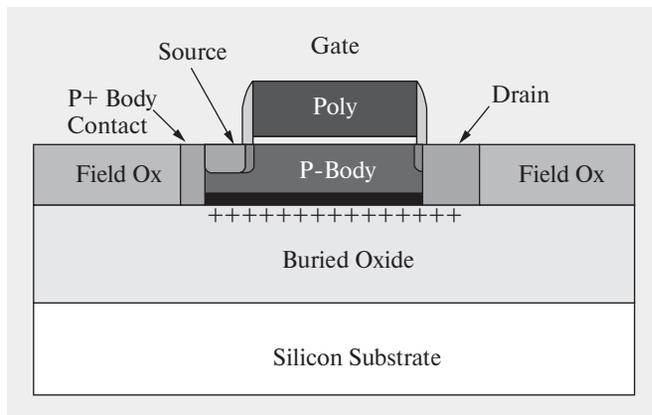


Рис. 8. Поперечное сечение BUSFET транзистора с различной глубиной залегания сток/истоковых областей [23].

1) Необходимостью использования дополнительных масок на этапе формирования сток/истоковых областей, что повышает сложность технологического маршрута и увеличивает стоимость конечного изделия.

2) Образование дополнительных паразитных емкостей вблизи границы раздела исток/подложка.

3) Ограничение к предельно допустимой толщине пленки кремния, вызванное необходимостью формирования активных областей прибора с различной глубиной.

Начиная с 1980 года, значительные усилия в области создания радиационно-стойких изделий микроэлектроники предпринимались компанией Honeywell. В настоящее время наиболее передовой разработкой компании является КНИ КМОП технология с проектными нормами 150 нм (рис. 9), которая позволяет реализовывать как ячейки памяти SRAM объемом до 64 Мб, так и схемы специального назначения (ASIC's). Радиационную стойкость своих продуктов Honeywell обеспечивает с помощью RnBP-методов, которые направлены на повышение качества используемых диэлектриков, использования щелевой изоляции и уникального дизайна транзисторной КМОП структуры. Таким образом, становится возможным проектирование ИМС, к которым предъявляются повышенные требования по стойкости к накопленной дозе, вплоть до 1 Мрад, при минимальном увеличении площади готового изделия [24].

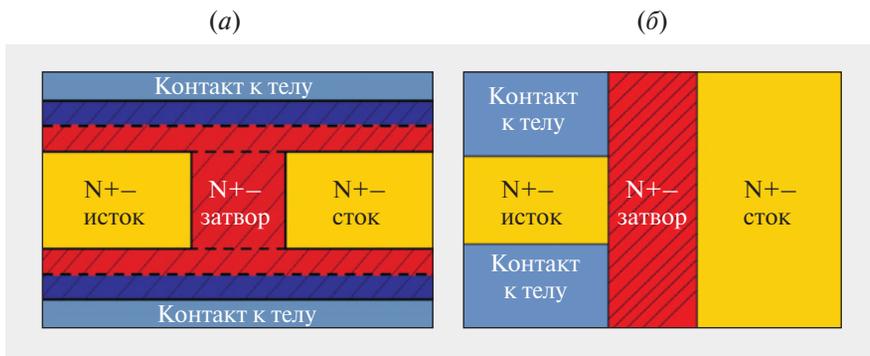


Рис. 7. Примеры конструкций n-канальных КНИ МОПТ. а) Транзистор Н-типа, б) Транзистор А-типа [9].

возможность применения принци-

пов масштабирования совместно с описанными ранее преимуществами, позволяют сделать вывод о перспективности применения представленной технологии и ее модификаций в обозримом будущем.

Анализ КНИ КМОП структуры компании X-FAB, выполненной по технологии XT-018 (рис. 10), свидетельствует о возможности изготовления ИМС с повышенной стойкостью к накопленной дозе. Подобный вывод делается на основе особенностей представленной структуры, среди которых можно выделить наличие щелевой изоляции, применение толстой пленки кремния, порядка нескольких микрометров, и формирование двойного кармана. Представленные конструкторские решения позволили полностью исключить эффект защелки и изолировать активную область прибора основного транзистора от влияния заряда, накапливаемого в скрытом оксиде заряда [25]. Однако использование толстой пленки кремния приводит к увеличению краевых внутритранзисторных токов утечки, что вынуждает разработчиков использовать структуры с кольцевой геометрией затвора, что приводит к увеличению площади ИМС.

Дополнительным конструктивным приемом, позволяющим повысить стойкость ИМС к накопленной дозе, можно считать использование генератора обратного смещения подложки, в состав которого входит устройство управления и блок накачки заряда. Принцип действия данного метода заключается в подаче обратного смещения на контакт к подложке, позволяя тем самым поддерживать закрытое состояние донных p-канальных транзисторов при накоплении положительного заряда в скрытом оксиде. К сожалению, данный метод также не лишен недостатков, которые выражаются в увеличении площади схемы,

ограниченном диапазоне подаваемых напряжений на подложку, необходимости формирования качественного контакта к подложке и надежностью блока накачки заряда [27].

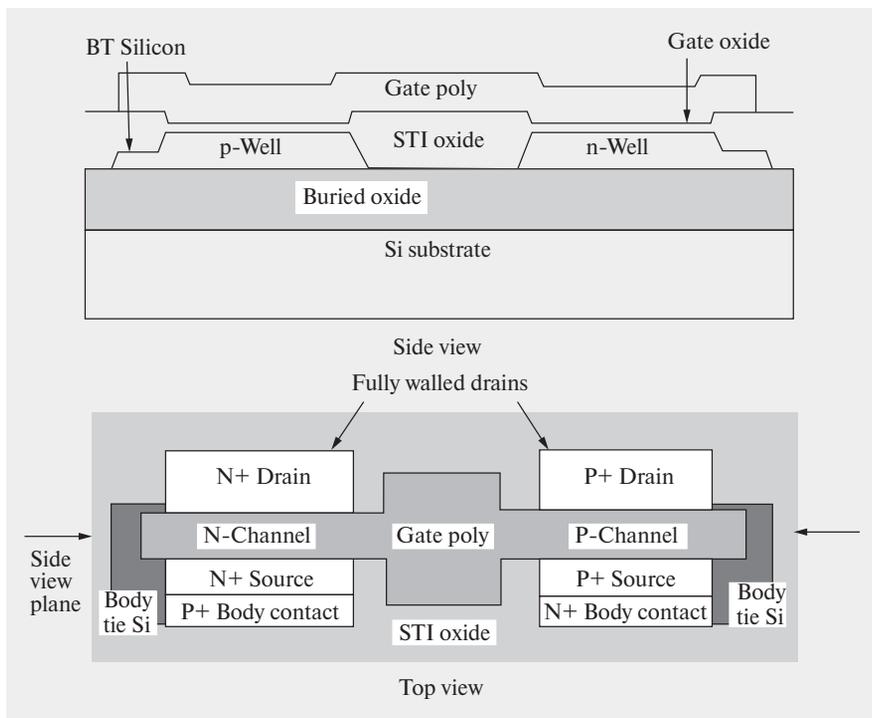


Рис. 9. Радиационно-стойкая КНИ КМОП структура, изготовленная компанией Honeywell с проектными нормами 150 нм [24].

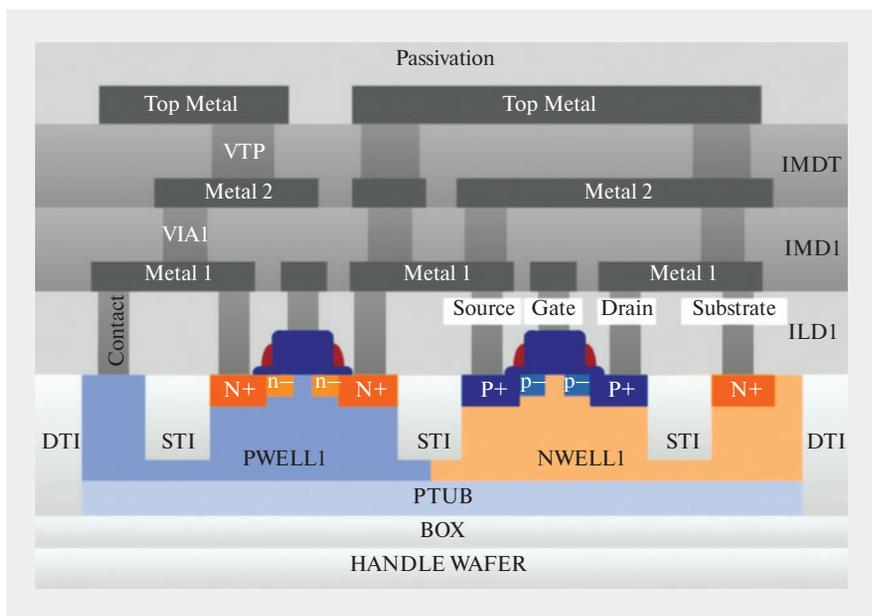


Рис. 10. Схематичное изображение КНИ КМОП структуры, изготовленной на основе технологии XT-018 компанией X-FAB, с проектными нормами 180 нм [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ научно-технической литературы показывает, что за деградацию основных параметров современных ИМС космического и специального назначения, выполненных по КНИ технологии, ответственен заряд, сгенерированный в объеме скрытого диэлектрика вблизи границы раздела Si/SiO₂ и на поверхностных состояниях. В отличие от объемных радиационных эффектов, с которыми удается бороться за счет схемотехнических приемов, поверхностные эффекты требуют от разработчиков действовать как технологические, так и конструктивные приемы. К наиболее практичным методам можно отнести использование генератора обратного смещения на подложке и переход на меньшие проектные нормы, поскольку данные подходы позволяют разработчикам оставаться в рамках базовой технологии. Однако из результатов работы становится очевидным, что начиная с проектных норм порядка 32 нм, дальнейшее повышение стойкости КНИ ИМС на транзисторном уровне становится проблематичным. Данные сложности обусловлены необходимостью использования полностью обедненных КНИ-транзисторов, которые в силу слабого легирования пленки кремния, имеют более низкую стойкость к накопленной дозе. Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что проектирование ИМС с повышенной стойкостью к накопленной дозе необходимо осуществлять на частично обедненных КНИ-транзисторах с применением как конструктивных, так и технологических приемов.

Несмотря на сделанное заключение, ряд компаний ведут активные работы в области разработки радиационно-стойких ИМС с проектными нормами 28 нм и менее. Наибольших успехов в данном направлении достигла компания ВАЕ, предоставляющая услуги в области проектирования ИМС на базе объемной технологии FinFET с проектными нормами 14 нм. Также стоит отметить работы объединенного европейского консорциума DANLIA, разрабатывающего радиационно-стойкую систему на кристалле на базе полностью обедненной КНИ технологии компании STMicroelectronics с проектными нормами 28 нм [28].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Auberton-Herve A.J.** SOI: Materials to systems // International Electron Devices Meeting. Technical Digest. – IEEE, 1996. – P. 3–10.
2. **Colinge J.P.** Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI: materials to Vlsi. – Springer Science & Business Media, 2004.
3. **Rezzak N. et al.** Total-ionizing-dose radiation response of partially-depleted SOI devices //2010 IEEE International SOI Conference (SOI). – IEEE, 2010. – P. 1–2.
4. **Paillet P. et al.** Total ionizing dose effects on deca-nanometer fully depleted SOI devices //IEEE transactions on nuclear science. – 2005. – Т. 52. – № 6. – P. 2345–2352.
5. **Таперо К., Улимов В., Членов А.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – С. 81–145.
6. **Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И.** Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994. – С. 36–42.
7. **Чумаков А.И.** Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. – 319 с. – ISBN 5-256-01745-4.
8. **Brown D.B., Saks N.S.** Time dependence of radiation-induced interface trap formation in metal-oxide-semiconductor devices as a function of oxide thickness and applied field //Journal of applied physics. – 1991. – Т. 70. – № 7. – P. 3734–3747.
9. **Селецкий А.В., Шелепин Н.А.** Проектирование и разработка элементов КМОП СБИС, предназначенных для функционирования в условиях воздействия космических ионизирующих излучений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 2016. – № 2. – С. 39–45.
10. **Schwank J.R. et al.** Radiation effects in SOI technologies // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2003. – Т. 50. – № 3. – P. 522–538.
11. **Ferlet-Cavrois V. et al.** Total dose induced latch in short channel NMOS/SOI transistors // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – Т. 45. – № 6. – P. 2458–2466.
12. **Hughes H. et al.** Total ionizing dose radiation effects on 14 nm FinFET and SOI UTBB technologies // 2015 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). – IEEE, 2015. – P. 1–6.
13. **Schwank J.R. et al.** Radiation effects in MOS oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – № 4. – P. 1833–1853.
14. **Barnaby H.J.** Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Т. 53. – № 6. – P. 3103–3121.
15. **Flament O. et al.** Effect of supplemental dose in SIMOX on very high ionizing dose response // Silicon-On-Insulator Technology and Devices, Electrochemical Society Proceedings. – 1994. – P. 381–389.

16. **H. Hughes, P. McMarr.** Radiation-hardening of SOI by ion implantation into the buried oxide, U.S. Patent No. 5 795 813.
17. **B.J. Mrstik, H.L. Hughes, P.J. McMarr, R.K. Lawrence, D.I. Ma, I.P. Isaacson, and R.A. Walker,** "Hole and electron trapping in ion implanted thermal oxides and SIMOX", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, no. 6, pp. 2189-2195, Dec. 2000.
18. **Paillet P. et al.** Comparison of X-ray-induced electron and hole trapping in various materials (YSZ, SIMOX, thermal SiO₂) // Journal of non-crystalline solids. - 1995. - Т. 187. - P. 170-174.
19. **Liu S.T., Jenkins W.C., Hughes H.L.** Total dose radiation hard 0.35/μm SOI CMOS technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 1998. - Т. 45. - № 6. - P. 2442-2449.
20. **Paillet P. et al.** Trapping-detrapping properties of irradiated ultra-thin SIMOX buried oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 1995. - Т. 42. - № 6. - P. 2108-2113.
21. **Wang J.J. et al.** Bonded wafer substrates for integrated detector arrays // IEEE transactions on nuclear science. - 1993. - Т. 40. - № 5. - P. 1342-1346.
22. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. - 2-е изд. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. - С. 89-119.
23. **Schwank J.R. et al.** BUSFET-a radiation-hardened SOI transistor // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 1999. - Т. 46. - № 6. - P. 1809-1816.
24. **Cressler J.D., Mantooth H.A. (ed.).** Extreme environment electronics. - CRC Press, 2017.
25. **Fernandez-Perez S. et al.** Radiation hardness of a 180 nm SOI monolithic active pixel sensor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2015. - Т. 796. - P. 13-18.
26. **Nguyen V.S.** Conception caractérisation et mise en oeuvre d'un circuit intégré type driver en CMOS pour composants GaN: дис. - Grenoble Alpes, 2016.
27. **Шелепин Н.А., Мещанов В.Д., Лушников А.С., Рыбалко Е.С.** КМОП КНИ интегральная микросхема с повышенной радиационной стойкостью // Патент РФ 2545325.
28. **Ключников А.С., Селецкий А.В., Шелепин Н.А.** Радиационная стойкость современных СБИС с глубокосубмикронными проектными нормами // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». - Алушта, 2019. - С. 239-240.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ С ИСТОЧНИКОМ ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ICPCVD НА ПЛАСТИНЫ ДИАМЕТРОМ ДО 300 ММ

► В.М. Долгополов, В.В. Одинокоев, П.А. Иракин, В.М. Варакин, С.В. Моргун, И.А. Усов
АО «НИИТМ»

Свойства и качество диэлектрических пленок, получаемых методом ICPCVD, широко известны. Однако решение проблемы равномерности при переходе на пластины диаметром до 300 мм является непростой задачей. Целью данной работы была разработка реактора с уникальной системой равномерной подачи газа для низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектрических слоев на пластины диаметром до 300 мм.

TECHNOLOGY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR LOW-TEMPERATURE PLASMA-CHEMICAL DEPOSITION OF DIELECTRIC LAYERS WITH A HIGH-DENSITY PLASMA SOURCE ICPCVD ON PLATES WITH A DIAMETER OF UP TO 300 MM

V.M. Dolgoplov, V.V. Odinokov, P.A. Iraquin, V.M. Varakin, S.V. Morgun, I.A. Usov

NIITM

The properties and quality of dielectric films obtained by ICPCVD are widely known. However, solving the problem of uniformity when switching to plates with a diameter of up to 300 mm is not an easy task. The aim of this work was to develop a reactor with a unique uniform gas supply system for low-temperature plasma-chemical deposition of dielectric layers on wafers with a diameter of up to 300 mm.

ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр изолирующих тонких пленок используется в современных СБИС, обеспечивая электрическую изоляцию между проводящими слоями внутри устройства и в качестве финишного пассивирующего слоя. Наибольшее распространение получили диоксид, нитрид и оксинитрид кремния. В зависимости от температуры осаждения существуют различные методы осаждения таких слоев. Химическое газофазное осаждение при

атмосферном давлении и химическое газофазное осаждение при низком давлении требуют высоких температур осаждения (превышающих 400 °С), в то время как в процессах плазмохимического осаждения из газовой фазы температура осаждения обычно меньше 400 °С. В этих процессах в газовой фазе происходят диссоциация и ионизация силанов или галогенсиланов и азот- или кислородсодержащих соединений, сопровождающиеся их адсорбцией и взаимодействием на поверхности подложки [1].

В условиях, характерных для низкотемпературной плазмы, используемой в процессах осаждения диэлектрических пленок, энергия электронов сравнительно низка и скорость генерации радикалов намного превышает скорость образования ионов. Вследствие чего радикалы легко адсорбируются на поверхности подложки, где подвергаются различным воздействиям, включая электронную и ионную бомбардировку, взаимодействуют с другими адсорбированными частицами, образуют новые связи и таким образом обеспечивают формирование и рост пленки.

Важной стадией роста пленок является диффузия адсорбированных атомов к стабильным положениям на поверхности подложки. Одновременно с формированием пленки должна происходить и десорбция газообразных продуктов реакции с поверхности. Скорости диффузии атомов и десорбции продуктов реакции сильно зависят от температуры подложки, причем при большей температуре получают пленки с меньшей концентрацией захваченных продуктов реакции, большей плотности и более однородным составом. Физико-химические процессы на поверхности, в частности процессы десорбции, могут стимулироваться ионной бомбардировкой и в значительно меньшей степени – электронной бомбардировкой и излучением плазмы.

Особый интерес вызывает способ осаждения высокоплотных диэлектрических пленок при еще более низких температурах (менее 150 °С), в особенности для устройств чувствительных к температуре, как например органические LED's. Для этой задачи широко используется технология плазмохимического осаждения из газовой фазы с источником высокоплотной плазмы [2, 3], позволяющая осаждать высококачественные диэлектрические пленки, при низких температуре и давлении.

Преимущество ICP источника над другими типами источников высокоплотной плазмы заключается в более легком масштабировании при проектировании источника для обработки пластин большого диаметра, низкой себестоимости. При наличии дополнительного источника ВЧ смещения на подложкодержатель появляется возможность контролировать плотность плазмы и энергии ионов независимо друг от друга. Это значительно расширяет возможность получения качественных диэлектрических пленок при помощи ICP источника. Например, в технологии заполнения сложного рельефа требуется бомбардировка ионами инертного газа (например Ar) одновременно с процессом осаждения пленки для предотвращения образования пу-

стот и обрывов на краях рельефа [4]. С другой стороны, для устройств чувствительных к повреждениям, как например для транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, НЕМТ), необходимо минимизировать энергию ионов, так как это основной фактор возникновения ионного повреждения в устройствах. К тому же использование ICP-CVD позволяет проводить процесс при давлениях от 0,5 до 13 Па, в отличие от PECVD, где давление может быть в 20 раз больше.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование процесса низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектрических слоев проводилось на базе конструктива установки «Изофаз ТМ», представленного на рис. 1.

Рабочая камера установки (представлена на рис. 2) представляет из себя реактор с ICP источником высокоплотной плазмы с частотой 13,56 МГц. Для создания смещения на подложку подается ВЧ мощность на нагреваемый рабочий столик реактора. Во избежание переосаждения продуктов реакции стенки реактора нагреваются до 60 °С. Подача рабочего газа в установку осуществляется разными путями. Монсилан подается через специальную систему газоподачи, о которой будет сказано далее. Аргон, кислород, азот и другие дополнительные газы подаются через кольцевой газовый коллектор, расположенный в верхней части реактора рядом с ICP источником плазмы.

При переходе на диаметр 300 мм на установках осаждения диэлектрических слоев использование



Рис. 1. Установка плазмохимического осаждения диэлектрических слоев «Изофаз ТМ 300».

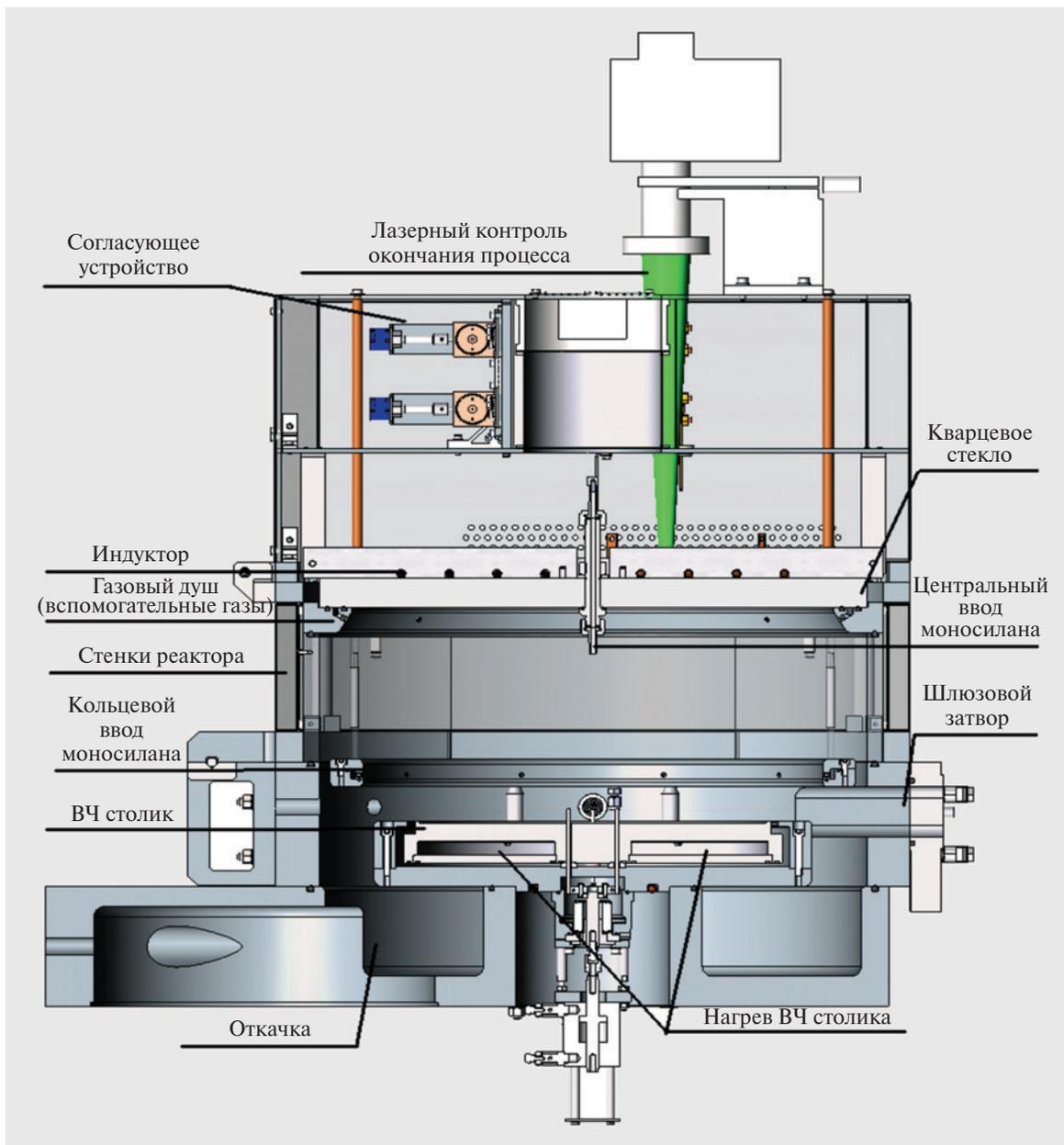


Рис. 2. Рабочая камера установки.

только кольцевого газового коллектора не обеспечивает достаточную равномерность осаждаемого электрического слоя. Скорость осаждения в центре пластины запаздывает по сравнению с краями пластины, что связано с обеднением газового потока моносилана. Для увеличения концентрации моносилана в центре пластины было решено ввести дополнительный независимый газовый ввод непосредственно над центром пластины. Таким образом, рабочий газ подается в реакционную камеру по кругу через кольцевой газовой коллектор и через независимый ввод непосредственно над пластиной.

С целью определения оптимального соотношения подачи газа через кольцевой газовой коллектор и независимый центральный ввод был проведен ряд экспериментов с подачей газа только через независимый центральный газовой ввод, только через кольцевой газовой коллектор и, после определения характера влияния ввода и кольца по отдельности, совместно. В целях экономии осаждение проводилось на 7 пластин диаметром 100 мм, расположенных на носителе.

На рис. 3а представлен результат осаждения электрической пленки при подаче моносилана толь-

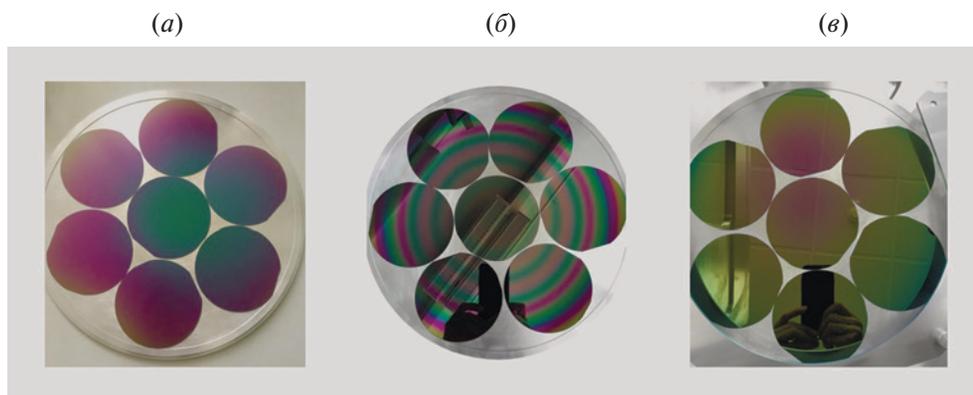


Рис. 3. Результаты осаждения SiO_2 :
 а) – подача моносилана в центр;
 б) – подача моносилана с краев;
 в) – подача моносилана совместно с краев и в центр.

ко через кольцевой коллектор, на рис. 3б представлен результат осаждения диэлектрической пленки при подаче моносилана только через независимый центральный ввод, а на рис. 3в представлен результат осаждения диэлектрической пленки при подаче моносилана совместно через кольцевой коллектор и центральный ввод. Все процессы осаждения проводились при одинаковых давлении, мощности источников плазмы и температуры рабочего столика. Расходы газа через кольцо при процессах 3а и 3в не изменялись, расход газа через центральный ввод в случае 3в уменьшен в 4 раза относительно случая 3б.

Как видно из рис. 3а, наблюдается небольшое смещение минимальной толщины относительно центра в сторону откачки, в тоже время при подаче газа через независимый центральный ввод (рис. 3б) осаждение происходит симметрично относительно центра. При совместной подаче газа (рис. 3в) смещение выражено более ярко по сравнению с рис. 3а, что возможно связано с суммарным увеличением расхода газа (к расходу газа через кольцевой газовый коллектор добавился расход газа через независимый центральный ввод).

На рис. 4 представлена зависимость распределения толщины осажденного диэлектрического слоя от расстояния край–центр–край.

Измерение толщины проводилось по оси перпендикулярной линии откачки, поэтому смещение в сторону откачки на графике не наблюдается. В результате эксперимента полученная неравномерность осажденного диэлектрического слоя по площади 300 мм составила $\pm 5,5\%$. Основная неравномерность связана с неравномерностью откачки и неоптимальным режимом подачи моносилана. На данный момент запланирован ряд экспериментов с целью оптимизации соотношения подаваемого газа через кольцевой газовый коллектор и независимый центральный ввод. Также планируется изменение диаметра отверстий кольцевого газового коллектора с целью компенсировать неравномерность откачки установки.

ВЫВОДЫ

Установка «Изофаз ТМ 300» уже позволяет осаждать диэлектрические пленки с неравномерностью $\pm 5,5\%$ на пластинах диаметром 300 мм. Дальнейшая оптимизация кольцевого газового коллектора и

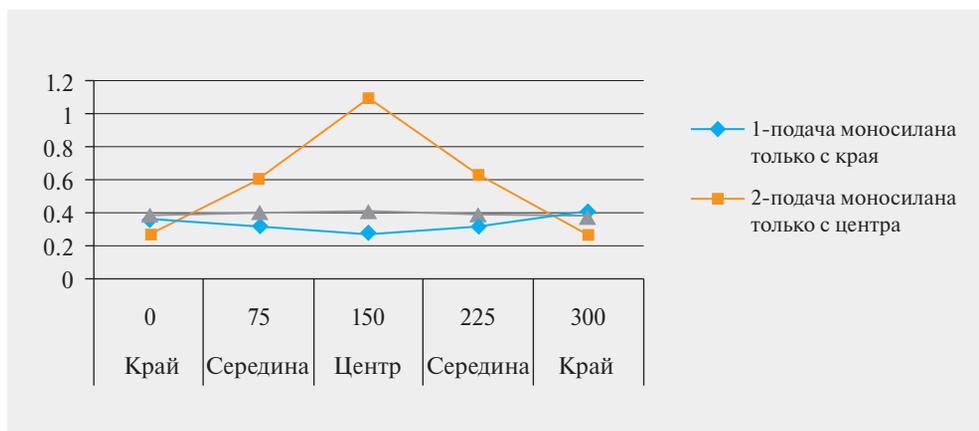


Рис. 4. График зависимости толщины осажденной диэлектрической пленки от расстояния край–центр–край.

режимов процесса позволят уменьшить неравномерность осаждаемого слоя до значения $\pm 2\%$ (на пластинах диаметром 200 мм), сопоставимого со значениями аналогичных зарубежных установок [5].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Ф.И. Осаждение тонких пленок из низкотемпературной плазмы и ионных пучков в технологии микроэлектроники. Моск. гос. ин-т электроники и математики. М., 2006. С. 25–27.
2. Охапкин А.И., Королёв С.А., Юнин П.А., Дроздов М.Н., Краев С.А., Хрыкин О.И., Шашкин В.И. Низкотемпературное осаждение пленок SiN_x в индуктивно-связанной плазме $\text{SiH}_4/\text{Ar}+\text{N}_2$ в условиях сильного разбавления силана аргоном. ФТП, 51(11), 2017.
3. Охапкин А.И., Королёв С.А., Юнин П.А., Дроздов М.Н., Краев С.А., Хрыкин О.И., Шашкин В.И. ФТП, 49(11), 1469 (2015).
4. Patent United States № US2014/0073143 A1, Mar. 13, 2014.
5. Установка низкотемпературного плазмохимического осаждения Advanced Vacuum – Apex LSR HDPCVD, 2018.

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ. Часть 3. Процессы с азотсодержащими предшественниками

► **В.Ю. Васильев**
НГТУ, ООО «СибИС»

В третьей части обзора проанализированы процессы атомно-слоевого осаждения тонких пленок диоксида кремния с использованием азотсодержащих реагентов-предшественников с термической и плазменной активацией. Обсуждаются схемы роста, состав и свойства слоев, проблемы характеризации и перспективы промышленного применения процессов.

ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS. Part 3. Processes with nitrogen-containing precursors

V. Yu. Vasilyev
NSTU, SibIS LLC

In the third part of the review, the processes of atomic layer deposition of thin films of silicon dioxide using nitrogen-containing precursor reagents with thermal and plasma activation are analyzed. The growth schemes, the composition and properties of the films, the problems of characterization, and the prospects for industrial application of the processes are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий обзор посвящен анализу и обобщению информационных источников с глубиной поиска 25 лет по результатам экспериментальных исследований процессов атомно-слоевого осаждения тонких пленок диоксида кремния (ТПДК) для нужд современных прецизионных технологий.

В первой части работы [1] рассмотрены общие вопросы и особенности метода атомно-слоевого осаждения (АСО), аппаратурные и методические вопросы получения тонких пленок диоксида кремния (ТПДК) в реакторах циклического действия. Во второй части работы [2] обобщены результаты публикаций по АСО с использованием в качестве реагентов-предшественников силанов, цианатов, хлорсиланов, а также различных кислородсодержащих реагентов. Принципиальным общим недостатком рассмотренных процессов формирования ТПДК, представляемых авторами работ как «АСО», явля-

ется использование очень больших доз реагентов и, соответственно, большой длительности экспозиции объектов в парах реагентов. При этом, однако, величины скорости осаждения, как правило, не превышают величин в малые доли монослоя. Возможность некоторого снижения доз реагентов и температуры осаждения для достижения тех же по уровню величин скоростей осаждения было отмечено при использовании в качестве катализаторов процессов осаждения азотсодержащих веществ (пиридин, аммиак). Напротив, некоторые процессы осаждения, названные авторами «быстрое атомно-слоевое осаждение» обнаружили аномальные для АСО, в десятки раз большие, скорости наращивания, априори указывающие на неправомерность применения механизма атомно-слоевого осаждения в силу противоречия с исходной идеей монослойного осаждения при АСО. Практически все рассмотренные в работе [2] варианты реализации процессов осаждения ТПДК

были признаны автором обзора с одной стороны – не отвечающими идее АСО, а с другой – фактически неприемлемыми для практического использования в современных технологиях.

В последнее десятилетие для получения ТПДК рядом зарубежных групп активно исследовались азотсодержащие реагенты-предшественники. Анализ и обобщение экспериментальных данных по таким процессам, как с термической, так и с плазменной активацией реагентов, является целью третьей части работы. При анализе использованы подходы к оценке характеристик процессов осаждения, изложенные в предыдущей работе [2]. Работы по моделированию в данном обзоре не рассматриваются.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТПДК

Базовые сведения по исследованным азотсодержащим реагентам-предшественникам, включая общепринятые аббревиатуры, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Примеры сведений об основных предшественниках группы аминов для АСО ТПДК по зарубежным информационным источникам и данным производителей реагентов (обозначения аналогичны табл. 1 в работе [2], прочерк – отсутствие данных)

Ссылка	Общепринятое зарубежное наименование реагента	Номер CAS	Принятое обозначение	Формула реагента	Масса, а.е.м.	γ , г/см ³	$T_{\text{кип}}$, °C
[3–17]	Tris(dimethylamino)silane	15112-89-7	TDMAS или 3DMAS	$\text{SiH}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_3$	161,32	0,838	142
[3]	Bis(dimethylamino)silane	–	BDMAS	$\text{SiH}_2[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_2$	118,24	–	–
[5]	Tetrakis(dimethylamino)silane	1624-01-7	TKDMAS	$\text{Si}(\text{N}(\text{CH}_3)_2)_4$	204,37	0,885	196
[10, 15, 16, 19, 20, 23]	Bis(diethylamino)silane	27804-64-4	BDEAS	$\text{SiH}_2[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_2$	174,36	0,804	188
[10, 13, 14, 23, 24]	Bis(tertiary-butylamino)silane	186598-40-3	BTBAS	$\text{SiH}_2[\text{NH}(\text{C}_4\text{H}_9)]_2$	174,36	0,816	167
[17, 25]	Bis(ethylmethylamino)silane	1011514-41-2	BEMAS	$\text{SiH}_2[\text{NC}_2\text{H}_5\text{CH}_3]_2$	146,31	0,800	134
[23, 24]	Di(sec-butylamino)silane	–	DSBAS	$\text{SiH}_3\text{N}(\text{C}_4\text{H}_9)_2$	159,24	–	–
[27]	Tetrakis(ethylamino)silane	17865-94-0	TEAS	$\text{Si}(\text{NHC}_2\text{H}_5)_4$	204,39	–	–
[28, 29]	Di(isopropylamino)silane	908831-34-5	DIPAS	$\text{SiH}_3\text{N}(\text{C}_3\text{H}_7)_2$	131,30	–	117
[31, 32]	1,2-Bis(diisopropylamino)disilane	–	BDIPASDS	$[\text{SiH}_2\text{N}(\text{C}_3\text{H}_7)_2]_2$	260,57	0,836	235
[33]	N-methyl-aza-2,2,4-trimethylsilacyclopentane	18387-19-4	–	$\text{C}_7\text{H}_{17}\text{NSi}$	143,30	0,813	137
[3]	N-(2-aminoethyl)-2,2,4-trimethyl-1-aza-2-silacyclopentane	18246-33-8	–	$\text{C}_8\text{H}_{20}\text{N}_2\text{Si}$	172,35	0,905	54–56 (2*)
[33]	N-allyl-aza-2,2-dimethoxysilacyclopentane	–	–	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{NO}_2\text{Si}$	187,31	–	–
[33]	2,2-dimethoxy-1,6-diaza-2-silacyclooctane	182008-07-7	–	$\text{C}_7\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2\text{Si}$	190,32	–	71–73 (2,5*)

Примечания: * мм рт.ст.

Количественные данные о реагентах приводятся по данным цитированных исследований, а также, при наличии, по данным вебсайтов производителей реагентов. Прочерки означают отсутствие данных. Реагенты условно можно разделить на несколько подгрупп: аminosиланы, например, $\text{SiH}_2[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_2$ и $\text{SiH}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_3$, смешанные азоткислород кремнийорганические вещества, например, $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, а также циклические соединения.

Циклические процессы с использованием TDMAS. Этот реагент-предшественник (также именуемый 3DMAS) выделен в отдельный подраздел, поскольку исследован намного больше, чем остальные аminosиланы [3–17], см. данные в табл. 2 в хронологическом порядке. В ряде работ проводилось сравнение TDMAS с другими аминами.

Авторы [3,4] исследовали возможность получения тонких пленок $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2$ для использования в качестве затворного диэлектрика в транзисторных

Таблица 2. Некоторые обобщенные литературные данные о процессах осаждения ТПДК (обозначения аналогичны табл. 2 в работе [2], прочерк – отсутствие данных)

Ссылка	Предшественник Окислитель (*активация плазмой)	T _d , °C	P _d , мм рт.ст.	Длитель- ность цикла, с	Время экспозиции реагентов, с, или доза реагентов, L	Окно АСО, °C	W _d , нм/цикл
[3, 4]	TDMAS в Ar O ₃ (50 г/м ³) в O ₂ , N ₂	275	1; 2,5; 5	85	20 5	–	0,02; 0,05; 0,08
	BDMAS O ₃ (50 г/м ³) в O ₂ , N ₂	275	1; 2; 5	85	20 5	–	0,03; 0,07; 0,12
[5]	TDMAS H ₂ O ₂ /H ₂ O	150; 450; 500	5	–	–	–	0,05; 0,15; 0,18
	а также: DMATMS, VTMOS, TVMOS, TKDMAS	–	–	–	–	–	–
[6–9]	TDMAS O ₃ /O ₂	25	–	–	0...0,6×10 ⁵ L 0...6,5×10 ⁹ L	–	0,03...0,035
[10]	TDMAS O ₃ /O ₂	250...600	–	–	0,5...3 2	300...500	~0,08
	BTBAS O ₃ /O ₂	250...573	–	–	2 2	300...500	~0,14
	BDEAS O ₃ /O ₂	250...500	–	–	2 2	300...400	~0,12
[11]	TDMAS H ₂ O*	25	–	–	20 (1,5×10 ⁴ L) 600	–	0,075
[12]	TDMAS O ₃ /O ₂	100; 200; 300	–	–	–	–	0,02; 0,07; 0,06
[13, 14]	TDMAS O ₃ /O ₂	250...350	–	–	–	–	0,06
	BTBAS O ₃ /O ₂	250...350	–	–	–	–	0,06
	AP LTO 330 O ₃ /O ₂	150...350	–	0,45...4.0	–	–	0,12
	TDMAS O ₂ *	150...300	–	–	–	–	0,12...0,1
	AP LTO 330 O ₂ *	30...200	–	1...16	–	–	0,20...0,16
[15, 16]	TDMAS O ₂ *	100...300	0,4 –	15...40	0,2–2	–	0,113...0,098
	BDEAS O ₂ *	200	0,014 0,15	4...14	–	–	0,114...0,123
	AP LTO 330 O ₃ /O ₂	200	–	35	–	–	0,185
[17]	TDMAS 5 и 10 вес.% O ₃ /O ₂	200; 400	1,5	15...40	2...4 8...24	–	0,03; 0,05
	BEMAS 5 и 10 вес.% O ₃ /O ₂	200; 300; 400	–	–	2...4 8...24	300...400	0,05; 0,095; 0,098
[18]	Смесь TKDMAS– Si(N(CH ₃) ₂) ₃ Cl O ₂ *	100...250	3	–	0,3...1	–	0,041 (150 °C)
[19]	BDEAS O ₂ *	50...400	0,15	–	0,01...0,120	–	0,17...0,08

Ссылка	Предшественник Окислитель (*активация плазмой)	T _d , °C	P _d , мм рт.ст.	Длитель- ность цикла, с	Время экспозиции реагентов, с, или доза реагентов, L	Окно АСО, °C	W _d , нм/цикл
[20]	BDEAS O ₂ * O ₃	25; 200	– 0,025 0,250	–	0,5 2	–	0,12 0
[23]	BDEAS O ₂ * BTBAS O ₂ * DSBAS O ₃ /O ₂ DSBAS O ₂ *	100...300 100...300 150...300 100...–300	– – – –	5 5 35 5	1...2 2,5 1...2 2,5 1...3 2 1...2 2,5	– – 150...300 –	0,1 (300 °C) 0,11 (300 °C) 0,16 (300 °C) 0,13 (300 °C)
[24]	BTBAS 13...18 вес.% O ₃ /O ₂ DSBAS 13...18 вес.% O ₃ /O ₂	100	– –	– –	5...10 0...60 5...10 0...60	– –	– –
[25]	BEMAS 3 и 6 вес.% O ₃ /O ₂	175...350	1...4	8...14	1...2 0,5...2	250...350	0,12 (320 °C)
[27]	TEAS O ₃ /O ₂	325...514	2...9	–	5...20 (2×10 ⁶ L) 80...250 (1,2×10 ⁸ L)	–	0,17 (478 °C)
[28]	DIPAS O ₃ /O ₂	100...250	10	37	5 10	–	0,22
[29]	DIPAS O ₂ *	60; 100; 150	–	25	0,1 3	60–150	0,125
[31]	BDIPADS 180 г/м ³ O ₃ /O ₂	50...250	–	<150	1...4 5...30	–	0,05 (50 °C) 0,17 (250 °C)
[32]	BDIPADS 90 г/м ³ O ₃ /O ₂	50; 100; 150	0,01 2	73	3 4	–	0,05; 0,10, 0,15

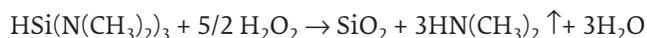
Примечания. Прочерк означает отсутствие прямых данных или невозможность определения данных по приведенным результатам

структурах с участием TDMAS (и BDMAS [4]), используя озон в качестве окислителя. Подготовка поверхности кремниевых пластин р-типа диаметром 300 мм включала промывку в 0,5% HF с последующим формированием слоя диоксида кремния толщиной 0,8 нм в печи при 650 °C. Индукционного периода роста не отмечалось. Данные о практически линейной зависимости скорости осаждения от давления в реакционной камере, табл. 2, явно указывают в пользу реализации обычного импульсного ХОГФ, чем АСО. Анализ концентраций примесей в ТП методом вторично-ионной масс-спектрометрии показал для TDMAS, ат/см³: [C] = 7,1 × 10²⁰, [N] = 3,4 × 10²⁰ и [H] ~ 2 × 10²¹. При этом авторы отмечали, что содержание углерода и азота в ТПДК из BDMAS было меньше, чем из TDMAS, на уровне 1,8 × 10²⁰ и 2,9 × 10²⁰ ат/см³, соот-

ветственно. В работе [3] приведены данные по обследованию электрических характеристик структур с тонкими пленками HfO₂-SiO₂.

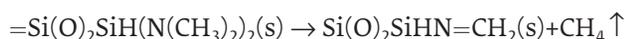
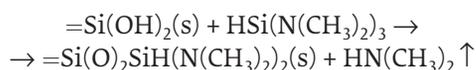
В работе [5] исследовано АСО на наночастицах ZrO₂ из ряда предшественников (TDMAS, TMSDMA, VTMOС, TVMOС, ТКDMAS). Первый из перечисленных His (N(CH₃)₂)₃ обнаружил наибольшую реакционную способность, в связи с чем исследован наиболее подробно. Исследования проведены с использованием метода in-situ FTIR (Fourier Transfer Infrared Spectroscopy, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье). В качестве второго реагента предполагалось использовать пары воды, однако было установлено, что при этом формируются крайне неактивные поверхностные группы Si-H(s). Для их удаления было решено использовать в качестве окислителя 50% по массе

перекись водорода. Предполагаемая авторами брутто-схема реакции взаимодействия выражена следующим образом (выделение газообразных продуктов реакции ниже показано стрелками с направлением вверх ↑):

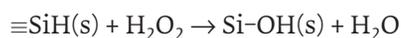
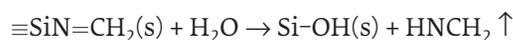
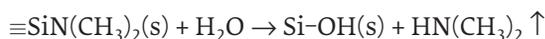


Авторы полагали, что перекись водорода удаляет нежелательные поверхностные группы Si-H(s), встраивающиеся в растущую ТПДК, таким образом, давая возможность формироваться необходимым для реакции поверхностным гидроксилсодержащим группам. На исходных наночастицах с помощью АСО из триметилалюминия и паров воды при 177 °С был выращен затравочный слой Al₂O₃ толщиной около 1 нм, что улучшало воспроизводимость поверхности объектов.

Данных о способе предварительного терминирования поверхности образца гидроксильными группами в публикации нет, однако, в схеме начального роста оно присутствует. Схема процесса роста ТПДК описывается уравнениями (2)–(6), уточненные автором обзора. На первой половине циклического процесса происходит взаимодействие TDMAS с поверхностными группами Si(OH)₂(s) с образованием и последующим преобразованием группы SiO–SiH(N(CH₃)₂)₂(s) и летучих продуктов реакции диметиламина HN(CH₃)₂ и метана CH₄:



Вторая половина циклического процесса описана авторами как взаимодействие образовавшихся групп с парами воды и, при температурах выше 450 °С, полное удаление групп ≡SiH(s) перекисью водорода (6) с формированием групп Si–OH(s):



Согласно приведенной в работе температурной зависимости в диапазоне 150...550 °С скорость осаждения возрастает от 0,05 до 0,18 нм/цикл с небольшим изломом в интервале 250...350 °С. Несмотря на то, что «Окна АСО» и насыщения скоростей осажде-

ния по реагентам в работе показано не было, авторы посчитали, что режим АСО имел место при температурах выше 450 °С. Малые скорости роста для TKDMAS авторы объяснили симметричностью молекулы и, следовательно, большей стабильностью в ходе реакции.

В серии работ [6–9] осаждение ТПДК проводилось в сверхвысоковакуумной камере на образцы из кремния (100) р-типа, представляющими собой призмы размером 0,5 × 10 × 40 мм со спиленными под 45° короткими сторонами. Такой вид образца необходим для исследования с помощью метода инфракрасной (ИК) спектроскопии, называемого методом «Множественного нарушенного полного внутреннего отражения» (МНПВО, английский термин MIR-IRAS). Обработка образца перед процессом включала стандартную химическую обработку RCA с последующим удалением естественного оксида погружением в HF. После установки образца в камеру установки проводилась его очистка путем резистивного нагрева до 1050 °С при давлении ~5 × 10⁻⁹ мм рт. ст.

При осаждении авторы использовали широкий диапазон доз реагентов (см. табл. 2, в терминах экспозиции длительности напуска реагентов составляли 600 с для озона с парами воды и 30 с для TDMAS). Экспериментально показаны изменения в ИК-спектрах при увеличении доз реагентов. Предложенная авторами схема процесса адсорбции TDMAS в ходе первой половины цикла процесса фактически была аналогична схеме (2) из ссылки [5] и подразумевала наличие исходной терминированной поверхности кремния с группами –OH. Далее на второй половине цикла при окислении озоном происходит удаление HN(CH₃)₂ аналогично схеме (3) выше и, затем, по идее авторов, для терминирования поверхности проводится обработка поверхности образца парами воды при температуре 160 °С с формированием –OH групп. Указанная температура была выбрана экспериментально как максимально эффективная. При этом обработка в озоне и парах воды предшествовала началу процесса осаждения.

Авторы [10] провели сравнение АСО ТПДК в идентичных экспериментальных условиях для предшественников TDMAS, BDEAS, VTBAS со смесью озона и кислорода. К сожалению, в работе нет данных об использованных химических обработках и способе терминирования поверхности. Результаты табл. 2 показывают, что во всех трех случаях авторы экспериментально приводят существование «Окна АСО»; в этой области температур неравномерность тол-

щины ТПДК по образцу была минимальна около 1...2%. Для TDMAS концентрация углерода составляла $\sim 3 \times 10^{20}$ ат/см³, примерно на порядок, превышая таковую для двух других предшественников. Интересным результатом является также экспериментально обнаруженные близкие величины показателя преломления около 1,430...1,450 для BDEAS, BTBAS в области «Окон АСО», в то время как для величины показателя преломления TDMAS снижались от 1,440 при 300 °С до 1,395 при 500 °С, что объяснено пористостью ТПДК. По мнению авторов наиболее эффективным предшественником является BTBAS как с точки зрения производительности АСО, так и с точки зрения качества ТПДК.

В работе [11] исследован процесс осаждения ТПДК на подложках кремния и германия с участием TDMAS и плазмоактивированных паров воды при комнатной температуре. Преимуществом авторы посчитали создание в ходе процесса терминированной -ОН группами поверхности растущей ТПДК.

Исследование [12] посвящено, в основном, электрофизическим свойствам ТПДК, полученным с участием TDMAS и озона на подложках кремния, прошедших обработку RCA с последующим погружением в HF. Проведенные исследования показали в сравнении с термическим диоксидом кремния достаточно высокое качество ТПДК толщиной порядка 3,5 нм, пригодное для использования в качестве затворного диэлектрика в транзисторных структурах.

Работа [13] посвящена сравнительному исследованию процессов АСО с участием TDMAS, BTBAS и коммерческого продукта AP-LTO® 330 (Air products and chemicals, US), химическая формула и характеристики которого в открытой печати не найдены. Прямое сравнение процессов на промышленном оборудовании позволило установить преимущества коммерческого реагента при АСО с плазменной активацией кислорода в плане достижения скорости осаждения около 0,2 нм/цикл при температуре около 30 °С. Развитие исследований получило в работе [14], в которой нанесение ТПДК осуществлялось на био-объекты на основе целлюлозы, требующие сверхнизкой температуры обработки. Осаждение ТПДК толщиной 20 нм проводилось при температуре около 100 °С с использованием озона и техники осаждения “stop flow” (закрывания откачной магистрали после напуска реагентов примерно на 10 с), позволяющее проводить экспозицию поверхности объектов длительное время при повышенном давлении за счет чего оказалось возможным суще-

ственно снизить температуру осаждения для получения приемлемых скоростей наращивания ТПДК).

Авторы работ [15,16] исследовали процессы осаждения и оптические свойства ТПДК, полученных на установках различного типа с использованием различных предшественников TDMAS, BDEAS и AP-LTO® 330 (химическая формула и характеристики неизвестны). Некоторые данные приведены в табл. 2. При анализе свойств ТПДК оказалось, что пленки, нанесенные при 200 °С с использованием TDMAS, имели небольшое механическое напряжение сжатия в диапазоне -30 МПа. Оценка значений напряжения пленки в течение 20 дней показала, что это напряжение изменяется к растягивающему напряжению при хранении образцов при температуре окружающей среды. Для предшественников TDMAS, BDEAS и AP-LTO® 330 значения напряжений после длительного срока составляли около 40 МПа, 10 МПа и 20 МПа, соответственно. Для пленок, полученных из TDMAS при 100 °С после длительного срока хранения величины механических напряжений составляли около 110 МПа. Релаксация напряжений указывает на то, что пленка не является сильно уплотненной и имеет открытые поры, которые могут заполняться водой из окружающей среды.

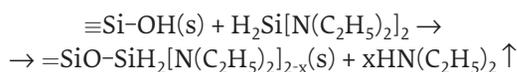
В работе [17] осаждение проводилось на подложках кремния диаметром 300 мм с участием предшественников TDMAS и BEMAS. Результаты для последнего оказались существенно лучше по скорости наращивания и обнаружения «окна АСО» в интервале 300...400 °С. Интересно отметить, что это едва ли не единственная работа, где рассматривается сравнение результатов осаждения ТПДК на высокоаспектных трехмерных структурах с помощью просвечивающей электронной микроскопии. К сожалению, авторы не привели исходных данных о структурах кроме аспектного отношения, равного 200, в связи с чем дать характеристику возможностей использованных предшественников с другими предшественниками невозможно. В связи с этим сравнение приведенных экспериментальных данных показывает, что величины конформности осаждения ТПДК для TDMAS и BEMAS составили 89% и 77%, соответственно. Предполагая проблемы с удалением побочных продуктов реакции из узких зазоров структур для улучшения конформности при использовании BEMAS, авторы увеличили длительность напуска озона с 30 с до 90 с, что позволило снизить скорость осаждения с 0,13 до 0,085 нм/цикл и достичь 97% конформности осаждения. Необходимо отметить, что приведенные в работе данные для структур и плоских поверхностей различа-

ются и не позволяют однозначно трактовать результаты, например выбор авторами оптимальной температуры осаждения 250 °С, которая находится вне «окна АСО».

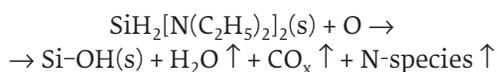
Циклические процессы с использованием иных аминов. Авторы [18] впервые рассмотрели возможность получения ТПДК при плазменной активации смеси реагентов $\text{Si}(\text{N}(\text{CH}_3)_2)_4$ (TKDMAS) и $\text{Si}(\text{N}(\text{CH}_3)_2)_3\text{Cl}$. Обнаружена обратная температурная зависимость скорости осаждения (0,044...0,033 нм/цикл) при довольно значимых концентрациях примесей [C] = 3,3...4,6 ат.% и [N]=3,3...3,9 ат.%.

В работе [19] рассмотрен плазмоактивированный процесс получения ТПДК из BDEAS, подаваемого чрезвычайно короткими импульсами, и кислорода, поступающего в реактор непрерывно, но активированного импульсами длительностью 0,5...5 с. С ростом температуры осаждения скорость наращивания уменьшалась в пределах 0,17...0,08 нм/цикл. Согласно постулатам АСО (см. [1]) это может указывать на процессы конденсации.

По аналогии с работой [5] авторы [19] предположили следующие схемы процессов:



Исходя из приведенной схемы авторы предположили возможность участия в реакции либо одного ($x = 1$), либо двух ($x = 2$) лигандов- $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. На второй половине цикла осаждения предложена достаточно условная схема реакции (без коэффициентов уравнивания и с представлением азотсодержащих побочных продуктов в виде N-species):



Авторы [20] рассмотрели возможность получения оксидов Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 при комнатной температуре с использованием в качестве окислителей либо плазмы кислорода, либо озона. Для получения диоксида кремния использован предшественник BDEAS. При использовании озона пленки не росли (в работе дается обсуждение этого явления), а с плазменной активацией скорость осаждения составляла 0,12 нм/цикл без индукционного периода. По мнению авторов, свойства пленок ТПДК, полученных при комнатной температуре и 200 °С, очень близки по стехиометрии O/Si (2,0 и 2,1) и плотности (1,9 и 2,0 г/см³), соответственно. При этом в обоих случаях концентрация углерода была

ниже предела обнаружения используемого метода анализа RBS 5 ат.%, а концентрация водорода составляла около 7 ат.%.

Интересным представляется анализ поверхностных процессов при осаждении ТПДК, в частности, трактовка результатов измерения с помощью метода in-situ ИК-спектроскопии концентрации поверхностных групп -ОН, необходимых для реакции. Авторы обнаружили, что при 25 °С концентрация -ОН групп в области 3100...3600 см⁻¹ максимальна и снижается при возрастании температуры поверхности. Это коррелирует с оценками поверхностной концентрации таких групп в работах [21, 22] на уровне 6,5 нм⁻² при 200 °С и 3,2 нм⁻² при 450 °С. По мере возрастания температуры поверхности две соседние гидроксильные группы могут рекомбинировать с образованием воды, удаляющейся с поверхности. Как результат, снижение поверхностной концентрации гидроксильных групп приводит к снижению скорости осаждения.

В работе [23] исследованы процессы роста из предшественников BDEAS, VTBAS и DSBAS на подложках кремния с участием озона или плазмоактивированного кислорода. Результаты приведены в табл. 2. Действительно, для системы DSBAS-O₃/O₂ скорость осаждения довольно высока и выше в сравнении с данными той же группы по VTBAS-O₃/O₂ и BDEAS-O₃/O₂, исследованными в тех же реакторах [9]. Авторы объяснили этот результат геометрическим различием площади проекции остатков молекул после их диссоциативной адсорбции с выделением аминогрупп: для DSBAS - SiH₃, для VTBAS - SiH₂(NHBu⁺) и для BDEAS - SiH₂(NEt₂). Расчетная площадь фрагмента -SiH₃ оказалась ~0,13 нм², что вдвое меньше, чем для двух других фрагментов (~0,26 нм²). Соответственно, занимая меньшую площадь фрагмент -SiH₃ не препятствует адсорбции других молекул DSBAS, таким образом, повышая плотность адсорбции. Плотность пленок ТПДК из DSBAS >2,1 г/см³, содержание водорода < 1021 ат/см³. Для плазменных процессов осаждения приведены сравнительные данные о свойствах и составе ТПДК, полученных с участием всех трех предшественников.

Авторы [24] с помощью in-situ FTIR детально исследовали начальные стадии процессов осаждения ТПДК из VTBAS и DSBAS с озоном. Используются слаболегированные термически окисленные подложки кремния с двусторонней полировкой, прошедшие ряд химических обработок для создания поверхности, терминированной -ОН группами с высокой поверхностной концентрацией. Кратко

резюмируя полученные авторами данные можно заключить следующее. Предшественники VTBAS и DSBAS легко реагируют при температуре 100 °С с поверхностными -ОН группами с образованием поверхностных $\equiv\text{Si-O-SiH}_3$ и $\equiv\text{Si-O-SiH}_2\text{-(NHBu}^t\text{)}$, соответственно. Обнаружено, что фрагмент -O-SiH_3 остается стабильным до 400 °С, после чего происходят перегруппировки в $(\text{-O-})_2\text{SiH}_2$ и $(\text{-O-})_3\text{SiH}$. Что касается второго фрагмента, то при 350 °С он теряет свою группу NHButi преобразуется в стабильную до 500 °С группу $(\text{-O-})_2\text{SiH}_2$. В обоих случаях преобразование в эти группы зависит от начальной концентрации гидроксильных групп. На процесс АСО сильно влияет концентрация озона, необходимого для окисления водорода в вышеупомянутых группах с формированием поверхностных гидроксидов, необходимых для продолжения процесса роста ТПДК.

В [25] авторы изучали VEMAS в реакции с парами воды и озоном. Последний окислитель, в отличие от первого, позволил достичь скорости наращивания ТПДК 0,12 нм/цикл. Невозможность получения ТПДК с участием паров воды авторы пояснили следующим образом: 1) при первом напуске предшественника к терминированной -ОН группами поверхности происходит отщепление аминогрупп с сохранением Si-H групп исходной молекулы; 2) при последующем напуске паров воды водород в Si-H не замещается на -ОН группы, то есть при последующем напуске молекулы VEMAS не могут адсорбироваться и, таким образом, рост ТПДК прекращается. В отличие от этого, озон окисляет связи Si-H с образованием -ОН групп на поверхности. Авторы обнаружили (но не пояснили) влияние увеличения времени продувки на снижение скорости осаждения примерно на 20%, а также зависимость скорости осаждения от давления в интервале 1...4 мм рт. ст. имеет выпуклый характер в пределах ~20% величины. Вместе с тем приведенная температурная зависимость показывает область «Окно АСО» в интервале 250...350 °С. К сожалению, не была показана возможность (невозможность) роста пленок в отсутствие другого реагента.

Плотность практически стехиометричных ТПДК составляли 2,17 г/см³, концентрации углерода и азота были <0,5 ат.%. Авторы отметили аномально высокую диэлектрическую постоянную около 9, что в два с лишним раза превышает типичные для диоксида кремния величины около 3,9. Эти наблюдения объяснили присутствием -ОН групп на уровне 10%, ссылаясь на результаты работы [26], в которой была показана корреляция диэлектрической

постоянной и концентрации -ОН групп в ТПДК на примере плазменного процесса осаждения ТПДК.

В работе [27] исследован процесс осаждения с использованием предшественника TEAS и озона на подложках кремния р-типа, с которых в буферированной фтористоводородной кислоте удалялся естественный оксид. Авторы обнаружили выход скорости осаждения на насыщение при импульсе TEAS более 10 с, однако даже при очень больших дозах по озону насыщения обнаружено не было. Данных о росте ТПДК в отсутствие второго реагента не приведено. Наиболее интересным результатом является температурная зависимость скорости осаждения, выраженная следующим образом по точкам 325; 360; 400; 440; 478 и 514 °С, соответственно: 0,07; 0,20; 0,21; 0,19; 0,17 и 0,16 нм/цикл. В качестве оптимальной температуры осаждения авторы выбрали 478 °С (хотя относительно «плоский» диапазон скорости наращивания был в интервале 370...400 °С). При высокой температуре скорость осаждения была достаточно высока, но в пленке отсутствовали примеси углерода и азота. Высокотемпературные пленки обнаружили также наименьшие скорости растворения в разбавленной HF и наилучшие электрофизические характеристики. Отметим, что температуры осаждения из TEAS максимальны из приведенных в табл. 2, что может быть объяснено, на наш взгляд, устойчивостью симметричной молекулы предшественника с большими аминогруппами при низкой температуре активации реакции.

Авторы [28] исследовали процесс осаждения из предшественника DIPAS по реакции с озоном, см. табл. 2. Оптимальные условия осаждения (и наилучшие электрические свойства) найдены при 200 °С (показатель преломления 1,46, шероховатость поверхности 0,21 нм, плотность 2,22 г/см³). В работе тех же авторов [29] исследован предшественник DIPAS с плазмоактивированным кислородом. Кинетические данные о росте ТПДК ограничены, однако показано насыщение по DIPAS и небольшая обратная температурная зависимость скорости осаждения (0,14 нм/цикл при 60 °С против 0,12 нм/цикл при 150 °С), которую можно принять за «Окно АСО». Показатель преломления ТПДК составил 1,46...1,50, плотность 2,2-2,3 г/см³, примеси водорода, углерода и азота были ниже предела обнаружения методом Оже-спектроскопии. Отмечено, что пленки, полученные при наименьших температурах, являются более гидрофобными, чем таковые, полученные при повышенных температурах. В контексте рассматриваемых

публикаций отметим исследование [30], в котором сравнительное моделирование величины ожидаемого «Окна АСО» для DIPAS и предшественников-аналогов с различными размерами лигандов (di(methylamine)silane, DMAS; di(ethylamino)silane DEAS; di(propylamino)silane DPAS; di(tertiarybutylamino)silane DTBAS, а также DSBAS) при их реакции с гидроксильрованной поверхностью показало преимущества использования предшественников DIPAS и DPAS.

Получение и свойства ТПДК из 1,2-bis(diisopropylamino)disilane (BDIPADS) и озона исследованы в [31, 32] разными коллективами авторов. По своему строению молекула этого нового реагента представляет собой как бы удвоенную молекулу DIPAS, в связи с чем в [32] проведено сравнение процессов осаждения и свойств ТПДК из этих предшественников. По мнению авторов, BDIPADS впервые обнаружил возможность получать низкотемпературные ТПДК в отсутствие активации плазмой или использования катализаторов. Данные о процессах приведены в табл. 2.

Процессы с использованием циклических предшественников. В работе [33] показана возможность получения ТПДК со скоростями наращивания 0,06...0,12 нм/цикл с близким к стехиометрии составом и малым содержанием примесей углерода и азота при температуре осаждения около 200 °С из 4-х циклических предшественников при взаимодействии с озоном в диапазоне температур 100...300 °С:

- N-methyl-aza-2,2,4-trimethylsilacyclopentane ($C_7H_{17}NSi$);
- N-(2-aminoethyl)-2,2,4-trimethyl-1-aza-2-silacyclopentane ($C_8H_{20}N_2Si$);
- N-allyl-aza-2,2-dimethoxysilacyclopentane ($C_8H_{17}NO_2Si$);
- 2,2-dimethoxy-1,6-diaza-2-silacyclooctane ($C_7H_{18}N_2O_2Si$).

Авторы отметили необходимость поддержания довольно длительной экспозиции в озоне около 30 с.

ОБСУЖДЕНИЕ

В порядке обсуждения рассмотренных выше результатов представляется важным отметить следующие моменты:

- аналогично с выводами, сделанными в работе [2] для циклических процессов осаждения ТПДК с использованием производных силана, цианатов, хлорсиланов, кислородсодержащих реагентов, для процессов с участием азотсодержащих реаген-

тов-предшественников также необходима тщательная подготовка поверхности объектов, начиная с самого первого цикла осаждения, а именно - создание качественно гидроксильной поверхности. Поверхностные гидроксильные группы являются и участниками реакции синтеза ТПДК. При этом необходимо иметь в виду, что концентрация поверхностных гидроксильных групп зависит не только от методов химической обработки и подготовки поверхности, но и от температуры осаждения;

- в опубликованных работах нет сведений о нуклеационных задержках при росте ТПДК, что свидетельствует о слабом вкладе нуклеационных явлений. Вероятно, это обусловлено тем, что во всех случаях использовались образцы с терминированной поверхностью группами -ОН, выравнивающими свойства поверхности;

- аналогично высказанному в [2] мнению автора, правильность использования термина «АСО» применительно к исследованным в настоящей работе процессам остается под вопросом. Действительно, во всех рассмотренных случаях в ходе цикла осаждения авторами для разных предшественников предполагались как минимум двухстадийные схемы процессов, включающие сначала реакцию предшественников с поверхностными гидроксильными группами с формированием неких промежуточных продуктов, а затем - их реакцию с окислителями с образованием ТПДК и воспроизведением гидроксильной поверхности объектов для реализации следующих циклов осаждения. Согласно постулатам АСО, предшественники должны адсорбироваться на поверхности без превращений;

- из исследованных предшественников явные преимущества имеют реагенты группы аminosиланов, дающие возможность получения ТПДК с приемлемой скоростью наращивания ~ 0,1...0,2 нм/цикл, при низких температурах и приемлемых дозах реагентов, то есть - с приемлемой для производства производительностью. При этом для некоторых предшественников обнаружены температурные интервалы с примерно постоянными скоростями наращивания, которые могут трактоваться как «Окна АСО». Однако подобные температурные профили могут быть и результатом протекания процессов химического осаждения из газовой фазы с лимитирующими поверхностными стадиями, что требует дополнительных исследований;

- для азотсодержащих реагентов-предшественников накоплено значительно больше экспериментальных данных о составе, и свойствах ТПДК, в сравнении с таковыми для производных силана,

Таблица 3. Данные о проанализированных публикациях с описаниями состава и свойств ТПДК

Характеристика ТПДК	Ссылки
Плотность ТПДК	[23, 28, 29, 31]
Шероховатость ТПДК	[28, 29, 31, 32]
Скорость растворения в растворах HF	[27, 32]
Механические свойства	[13, 15, 16]
Угол смачивания (контактный угол)	[13, 29]
Показатель преломления	[10, 15, 19, 29, 33]
Оптические свойства	[15, 16]
Состав ТПДК (стехиометрия, Si–O, Si–OH)	[3–9, 11, 19, 20, 24, 25, 28, 29]
Концентрация примесей С, N, H в ТПДК	[3, 4, 13, 18, 20, 23, 27, 29, 31, 33]
Электрические свойства	[3, 8, 11, 12, 17, 19, 23, 25, 27, 28, 29, 31, 32]
Конформность пленки на рельефе	[13, 17, 19]

цианатов, хлорсиланов, кислородсодержащих реагентов. Поскольку свойства ТПДК (в особенности электрические свойства), специфичны, определяются конкретными требованиями применения и определяются, в первую очередь, используемыми предшественниками и условиями реализации процессов осаждения, их анализ выходит за рамки настоящей работы. Систематизированные данные проанализированных публикаций о выполненных исследованиях приведены в табл. 3 и их объем может быть соотнесен с использованными реагентами и условиями в табл. 2;

– необходимо отметить очень малое количество опубликованных результатов по исследованиям конформности осаждения ТПДК на реальных трехмерных структурах. Этот вопрос, очевидно, требует дополнительных исследований. При этом важно, что необходимо понимание адекватности трактовки разными авторами получаемых данных для разных типов структур. Анализ проблем, методологии и трактовки результатов исследований конформности роста тонких пленок, в частности, был предметом недавних публикаций [34, 35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в настоящей работе обзор информации об исследованных циклических процессах осаждения показывает, что разработка процессов осаждения ТПДК оказалась серьезной задачей и потребовала длительного времени, исследования различных по природе реагентов-прекурсоров, а также вторых реагентов – окислителей. Обзор и анализ информации позволяют прийти к следующим основным выводам по работе в целом:

– готовность циклических процессов получения ТПДК к производству можно оценить как очень высокую. Серийно выпускается конструктивно разнообразное оборудование, не требующее специальных модификаций и ряд промышленно выпускаемых реагентов с регистрацией CAS. В настоящее время в литературе не выявлен однозначный выбор реагента для промышленного производства ТПДК. По-видимому, одним из наиболее вероятных кандидатов может быть реагент AP-LTO 330 производителя Air products and chemicals (США), который упоминался в презентациях производителя оборудования для осаждения. Окончательный выбор наиболее предпочтительного реагента можно ожидать в ближайшее время;

– наилучшими реагентами-окислителями при использовании аminosиланов являются либо озон/кислородные смеси, либо плазмоактивированный кислород. При этом последний обнаружил возможность получения ТПДК при существенно меньших температурах, чем первый, что для многих современных приложений может иметь решающее значение;

– ввиду явной недостаточности информации остается открытым вопрос о преимуществах реагентов-предшественников, окислителей, условий реализации процессов осаждения с точки зрения результатов исследований конформности роста ТПДК в трехмерных структурах. Этот вопрос является наиболее актуальным, поскольку одним из преимуществ метода АСО постулировалась возможность выращивания конформных покрытий на максимально сложных рельефах современных приборов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев В.Ю.** Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния для микро- и нанoeлектроники. Часть 1. Постановка задач, методология осаждение пленок // В печати.
2. **Васильев В.Ю.** Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния для микро- и нанoeлектроники. Часть 2. Процессы с силанами, цианатами, хлорсиланами, кислородсодержащими реагентами // В печати.
3. **Kamiyama S., Miura T., Aoyama T., Kitajima H., Arikado N.** High Quality Hf-Silicate Gate Dielectrics Fabrication by Atomic Layer Deposition (ALD) Technology // Ext. Abstr. 2004 Int. Conf. on Solid State Dev. Mater., Tokyo, 2004, p.p. 754-755.
4. **Kamiyama S., Miura T., Nara Y.** Comparison Between Hf-Silicate Films Deposited by ALD with BDMAS [$\text{SiH}_2(\text{N}(\text{CH}_3)_2)_2$] and TDMAS [$\text{SiH}(\text{N}(\text{CH}_3)_2)_3$] Precursors // Electrochem. Solid State Lett., 2005, vol. 8, no 10, p.p. F37- F39.
5. **Burton B.B., Kang S.W., Rhee S.W., George S.M.** SiO_2 Atomic Layer Deposition Using Tris(dimethylamino)silane and Hydrogen Peroxide Studied by in Situ Transmission FTIR Spectroscopy // J. Phys. Chem., 2009, vol. 113, no 19, p.p 8249-8257.
6. **Kinoshita Y., Hirose F., Miya H., et al.** Infrared Study of Tris(dimethylamino)silane Adsorption and Ozone Irradiation on Si(100) Surfaces for ALD of SiO_2 // Electrochem. Solid State Lett., 2007, vol. 10, no 10, p.p. G80- G83.
7. **Hirose F., Kinoshita Y., Shibuya S., et al.** Atomic-layer-deposition of SiO_2 with tris(dimethylamino)silane (TDMAS) and ozone investigated by infrared absorption spectroscopy // ECS Transactions, 2008, vol. 13, no 1, p.p. 171-177.
8. **Hirose F., Kinoshita Y., Shibuya S., et al.** Low-temperature-atomic-layer-deposition of SiO_2 with Tris(dimethylamino)silane (TDMAS) and Ozone using Temperature Controlled Water Vapor Treatment // ECS Transactions, 2009, vol. 19, no 2, p.p. 417-426.
9. **Hirose F., Kinoshita Y., Shibuya S., et al.** Atomic layer deposition of SiO_2 from Tris(dimethylamino)silane and ozone by using temperature-controlled water vapor treatment // Thin Solid Films, 2010, vol. 519, p.p.270-275.
10. **O'Neill M.L., Bowen H.R., Derecskei-Kovacs A., et al.** Impact of Aminosilane Precursor Structure on Silicon Oxides by Atomic Layer Deposition // The Electrochemical Society Interface, Winter 2011, p.p. 33-37.
11. **Degai M., Kanomata K., Momiyama K., et al.** Non-heating atomic layer deposition of SiO_2 using tris(dimethylamino)silane and plasma-excited water vapor // Thin Solid Films, 2012, vol. 525, p.p. 73-76.
12. **Han L., Chen Z.** High-Quality Thin SiO_2 Films Grown by Atomic Layer Deposition Using Tris(dimethylamino)silane (TDMAS) and Ozone // ECS J. Sol. State Sci. Technol., 2013, vol. 2, no 11, p.p. N228-N236.
13. **Putkonen M., Bosund M., Oili M.E. et al.** Thermal and plasma enhanced atomic layer deposition of SiO_2 using commercial silicon precursor // Thin Solid Films, 2014, vol. 558, p.p. 93-98.
14. **Putkonen M., Sippola P., Svärd L., et al.** Low-temperature atomic layer deposition of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ multilayer structures constructed on self-standing films of cellulose nanofibrils // Phil., Trans. R. Soc. A376, #201700378, 12 pages.
15. **Pfeiffer K., Shestaeva S., Bingela A., Munzert P., Schulz U.** Atomic layer deposition for antireflection coatings using SiO_2 as low-refractive index material // Proc. of SPIE, 2015, vol. 9627, p.p. 96270 Q1-Q7.
16. **Pfeiffer K., Shestaeva S., Bingela A., et. al.** Comparative study of ALD SiO_2 thin films for optical applications // Optical Materials Express, 2016, vol. 6, no 2, p.p. 660-670.
17. **Ahn S., Kim Y., Kang S., et al.** Low-temperature-atomic-layer-deposition of SiO_2 using various organic precursors // J. Vac. Sci. Technol. A, 2017, vol. 35, no. 1, 01B131-4 pages.
18. **Lim J.W., Yun S.J., Lee J.H.** Low-Temperature Growth of SiO_2 Films by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition // ETRI Journal, vol. 27, no 1, p.p. 118-121.
19. **Dingemans G., van Helvoirt C.A. A., Pierreux, D., Keuning W., Kessels W.M.M.** Plasma-Assisted ALD for the Conformal Deposition of SiO_2 : Process, Material and Electronic Properties // J. Electrochem. Soc., 2012, vol. 159, no 3, p.p. H277-H285.
20. **Potts S.E., Profijt H.B., Roelofs R, Kessels W.M.M.** Room-Temperature ALD of Metal Oxide Thin Films by Energy-Enhanced ALD // Chem. Vap. Deposition, 2013, vol. 19, p.p. 125-133.
21. **Haukka S., Lakomaa E.-L., Suntola T.** Surface coverage of ALE precursors on oxides // Appl. Surf. Sci., 1994, vol. 82/83, p.p.548-552.
22. **Haukka S., Suntola T.** Advanced Materials Processing by Adsorption Control // Interface Science, 1997, no 5, p.p.119-128.

23. **Mallikarjunan A., Chandra H., Xiao M., et al.** Designing high performance precursors for atomic layer deposition of silicon oxide // *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2015, vol. 33, no 1, 01A137-4 pages.
24. **Pena L.F., Nanayakkara C.E., Mallikarjunan A., et al.** Atomic Layer Deposition of Silicon Dioxide Using Aminoisilanes Di-*sec*-butylaminosilane and Bis(*tert*-butylamino)silane with ozone // *J. Phys. Chem.*, 2016, vol. 120, no 20, p.p.10927-10935.
25. **Won S.-J., Jung H.-S., Suh S., et al.** Growth and electrical properties of silicon oxide grown by atomic layer deposition using Bis(ethyl-methyl-amino) silane and ozone // *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2012, vol. 30, no 1, p.p. 01A126-1/7.
26. **Flower B., O'Brien E.** Relationships between the material properties of silicon oxide films deposited by electron cyclotron resonance chemical vapor deposition and their use as an indicator of the dielectric constant // *J. Vac. Technol. B.*, 1994, vol. 12, no 1, p.p. 441-448.
27. **Kim J.-K., Jin K., Jung J., et al.** Atomic Layer Deposition of SiO₂ Thin Films Using Tetrakis(ethylamino)silane and Ozone // *J. Nanosci. & Nanotechnol.*, 2012, vol. 12, p.p. 3589-3592.
28. **Lee Y.-S., Choi D.-W., Shong B., et al.** Low temperature atomic layer deposition of SiO₂ thin films using diisopropylaminosilane and ozone // *Ceramic Intern.*, 2017, vol. 43, p.p. 2095-2099.
29. **Lee Y.-S., Han J.-H., Park J.-S., Park J.** Low temperature SiO_x thin film deposited by plasma enhanced atomic layer deposition for thin film encapsulation applications // *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2017, vol. 35, no 4, p.p. 041808-1/6.
30. **Huang L., Han B., Fan M., Cheng H.** Design of efficient mono-aminosilane precursors for atomic layer deposition of SiO₂ thin films // *RSA Advances*, 2017, vol. 7, p.p. 22672-22678.
31. **Kim D.H., Lee H.J., J H., et al.** Thermal Atomic Layer Deposition of Device-Quality SiO₂ Thin Films under 100 °C Using an Aminodisilane Precursor // *Chem. Mater.*, 2019, vol. 31, no 15, p.p. 5502-5508.
32. **Nam T., Lee H., Choi T., et al.** Low-temperature, high-growth-rate ALD of SiO₂ using aminodisilane precursor // *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 485, p.p. 381-390.
33. **Ju L., Strandwitz N.C.** Cyclic azasilanes as volatile and reactive precursors for atomic layer deposition of silicon dioxide // *J. Mater. Chem. C.*, 2016, iss.18, p.p. 3875-4080.
34. **Васильев В.Ю.** О методологии оценки конформности атомно-слоевого осаждения тонких пленок в высокоаспектных наноструктурах // *Наноиндустрия*, 2019, Т. 12, № 3-4, С. 194-204.
35. **Cremers V., Puurunen R.L., Dendooven J.** Conformality in atomic layer deposition: Current status overview of analysis and modelling // *Appl. Phys. Rev.*, 2019, vol. 6, p.p. 02321-1/43.

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ*

► **В.Ю. Васильев**
НГТУ, ООО «СибИС»

Выполнен обзор информационных источников с глубиной поиска 25 лет по результатам экспериментальных исследований процессов атомно-слоевого осаждения тонких слоев нитрида кремния с термической и плазменной активацией для применения в современных микро- и нанoeлектронных технологиях.

ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS

V.Yu. Vasilyev

NSTU, SibIS LLC

A review of information sources with a search depth of 25 years is presented based on the experimental results of studies of atomic layer deposition of thin layers of silicon nitride with thermal and plasma activation for use in modern micro- and nanoelectronic technologies.

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс полупроводниковой промышленности последних десятилетий во многом определяет развитие современного материаловедения и технологий создания функционально необходимых материалов [1–3]. Полупроводниковые приборы, микро- и нанoeлектронные устройства, а также прецизионные микроминиатюрные изделия микро- системной техники изготавливаются с помощью интегральных технологий [4–8]. Конструктивной основой современных прецизионных устройств (прежде всего – драйвера развития прецизионных технологий – интегральных микросхем ИМС) являются тонкослойные (ТС) диэлектрические, полупроводниковые и проводящие неорганические материалы. Ведущее место для их создания занимают новые или непрерывно совершенствуемые методы химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) [9–16]. С их помощью необходимые материалы синтезируются путем необратимых химических реакций непосредственно в ходе многоступенчатых и непрерывно усложняющихся технологических циклов изготовления прецизионных

устройств. Качество исходных и конечных ТС материалов и производственные технологические процессы их создания контролируются с помощью статистических методов, обеспечивающих высочайшую воспроизводимость (повторяемость) современных технологий и, следовательно, воспроизводимость состава, структуры и свойств ТС [17].

Совокупность общих вопросов ХОГФ ТС применительно к технологиям ИМС уровня более 180 нм была обобщена автором в [18, 19]. Там же были ретроспективно систематизированы основные итоги исследований и разработок методов ХОГФ для ИМС, которые позволили выделить задачи дальнейшего развития методов для создания перспективных прецизионных приборов. Для современных интегральных технологий требуются прецизионные ТС нанометрового диапазона толщин с необходимой совокупностью свойств и их высокой воспроизводимостью. Эти требования распространяются как на поверхность сложных трехмерных рельефов ИМС, так и на большие площади современных подложек (достигающих для подложек ИМС ~700 см²) и, в некоторых случаях,

* Материал статьи был представлен в приглашенном докладе на 5-ом семинаре по проблемам химического осаждения из газовой фазы, 3–5 февраля 2020 года, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

на группы одновременно обрабатываемых подложек (до 150 штук).

Наиболее сложным требованием современных технологий является получение так называемых «конформных» ТС наноразмерных толщин на современных рельефных структурах с большими аспектными отношениями. Под термином «конформность» обычно подразумевается процентное отношение толщины ТС в нижней части структуры (отверстия, канавки) на внутренней боковой поверхности к таковой на ее верхней плоской поверхности. По результатам исследований для разных процессов ХОГФ конформность ТС может изменяться от 100% в верхней части канавок вплоть до нуля (то есть разрыва сплошности материала) в нижней их части. Вопросы конформности роста ТС при ХОГФ, в том числе с количественной характеристикой известных методов ХОГФ, подробно проанализированы в работах [18, 19]. В частности, было показано, что по мере усложнения структур известные методы ХОГФ не позволяли достичь желаемых результатов по конформному осаждению ТС и потребовались новые методы решения этих задач.

Одним из решений по созданию конформных ТС покрытий на высокоаспектных структурах в середине 1990-х годов был предложен метод так называемого «Атомно-Слоевого Осаждения, АСО» (в зарубежной литературе – “Atomic Layer Deposition, ALD” [20]). В отличие от традиционного ХОГФ, при котором реагенты в нужной концентрации подаются в реактор одновременно и непрерывно, метод АСО основан на идее циклической организации процесса. В циклических процессах путем последовательной импульсной подачи реагентов, включающей напуск исходного реагента (прекурсора), продувку инертным газом или вакуумную откачку, напуск второго реагента, продувку или вакуумную откачку. При некоторых условиях обнаруживается эффект так называемой «самонасыщающейся», или «самоограничивающейся адсорбции» (“self-limiting adsorption”) одного из реагентов на поверхности подложки с последующей его реакцией с подаваемым в реактор вторым реагентом. В этом случае процесс АСО происходит в некотором узком температурном диапазоне, называемом «окно АСО» (“ALD-window”). В идеальном случае ввиду отсутствия диффузионных ограничений создаются условия для прецизионного роста конформных ТС наноразмерного диапазона толщин. Благодаря таким преимуществам и возможностям для технологии ИМС методы АСО в течение двух последних десятилетий интенсивно исследуются, развиваются и осваиваются промышленностью.

Развитие методов АСО сопровождается интенсивной публикационной активностью и рядом обобщений разных групп исследователей, например, [21–26]. В том числе исследовался один из наиболее востребованных материалов в технологии ИМС и других перспективных приборов – тонкие слои нитрида кремния (ТСНК), который является предметом настоящего обзора.

Краткое обобщение совокупности ранее опубликованных обзорных материалов

ТСНК используются в технологиях прецизионных устройств благодаря наличию у них ряда уникальных свойств, например, устойчивости к агрессивным химическим кислотам (фтористоводородная, горячая ортофосфорная), отличии скоростей плазменного травления во фторсодержащих газовых смесях от таковых для диоксида кремния (что обеспечивает селективность травления), повышенной стойкости к окислительным средам, повышенной твердости, геттерирующих свойств по отношению к нежелательным для технологии ИМС ионам натрия и т.д. Информация о ТСНК впервые была систематизирована в обзорных публикациях [27, 28]; дальнейшие обзорные публикации касались вопросов применения ТСНК [29, 30], обобщений исследований электронной структуры [31], тенденций развития методов получения ТСНК различного состава, включая ХОГФ и АСО [32, 33]. Последней по времени является обзорная работа автора в 8 частях [34–41], написанная по материалам анализа совокупности оригинальных публикаций последних лет. В этой статье применительно к прецизионным технологиям рассмотрены результаты исследований и разработок процессов получения ТСНК следующими методами (обозначение методов дается в соответствии с [34–41]):

(1) в групповых реакторах проточного типа низкого давления (НД) при химическом осаждении из газовой фазы (ХОГФ в РНД) с термической активацией [34] (за рубежом известен как LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition);

(2) в индивидуальных и групповых реакторах циклического действия при термически активированном атомно-слоевом осаждении (ТА-АСО) [35] (ТА-ALD – Thermally-Activated Atomic Layer Deposition);

(3) в индивидуальных и групповых реакторах проточного типа при плазмохимическом осаждении (ПХО) [36] (PECVD – Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition);

(4) в индивидуальных реакторах проточного типа при плазмохимическом осаждении с активацией плазмой высокой плотности (ПХО с ПВП) [37] (HDP-CVD – High Density Plasma Chemical Vapor Deposition);

(5) в индивидуальных и групповых реакторах циклического действия при плазменной активации АСО (ПА-АСО) [38] (PA-ALD – Plasma-Activated ALD, или PE-ALD – Plasma-Enhanced ALD);

(6) в индивидуальных реакторах проточного типа с каталитическим осаждением (К-ХОГФ) [39] при использовании термической реакции гидридов кремния и азота на раскаленной вольфрамовой нити (Cat-CVD – Catalytic Chemical Vapor Deposition).

Из перечисленных выше промышленными методами для микроэлектронных и прецизионных технологий стали методы (1), (3), (4), представляющие наибольший интерес как база для анализа и сравнения характеристик ТСНК. Метод (6) применяется в иных технологиях, где необходимо обеспечивать получение ТСНК на больших площадях объектов при низкой температуре. Методы АСО (2), (5) пока еще находятся в стадии исследований.

Краткая характеристика ТСНК, полученных методами 1, 3, 4, 6

Основные информационные данные о методах (1)–(6) приведены в табл. 1 по данным [34–41]. Наглядное сравнение методов включает примерные диапазоны температур осаждения (T_d), скоростей наращивания ТСНК (W_d), соотношения Si/N,

концентрации водорода [H]. Можно видеть, что величины скоростей наращивания при сравнительных температурах могут отличаться более чем на три порядка величины, а остальные приведенные характеристики – отличаться в разы.

В отличие от цитированных выше обзорных материалов, автором [40, 41] было проведено сравнительное обобщение экспериментальных данных по составу и основным физико-химическим свойствам и особенностям ТСНК, полученных указанными выше методами. Нитрид кремния описывается стехиометрической формулой Si_3N_4 , соответствующей соотношению $Si/N = 0,75$. Однако в случае получения ТСНК различными методами ХОГФ использование стехиометрической формулы Si_3N_4 не является правильным, поскольку состав слоев зависит от условий синтеза: типа исходных химических реагентов, условий ХОГФ (главным из которых является температура), способа активации реакции [40]. Все эти параметры приводят к большим или меньшим отклонениям стехиометрии, как правило, в сторону обогащения по кремнию, табл. 1.

Помимо кремния и азота наиболее распространенным компонентом ТСНК является водород, присутствующий в исходных реагентах [28]. Общая концентрация водорода в ТСНК может быть от нескольких единиц атомных % (метод (1): высокие температуры ХОГФ, при которых материал максимально близок к стехиометрии) до нескольких десятков атомных процентов (метод (3): низкие температуры

Таблица 1. Современные методы получения ТСНК для прецизионных технологий и примерные обобщенные диапазоны их характеристик

Метод (обозначение и английская аббревиатура)	Основные реагенты-прекурсоры	Вторые реагенты	Примерные обобщенные диапазоны характеристик для методов осаждения пленок нитрида кремния				Ссылка
			T_d , °C	W_d , нм/мин (CVD), или нм/цикл (ALD)	Si/N	[H], at. %	
(1) LPCVD	SiH_2Cl_2 ; $SiCl_4$; SiH_4	NH_3	700...850	1,5...4	0,75	< 5	[34]
(2) TA-ALD	$SiCl_4$; SiH_2Cl_2 ; Si_2Cl_6 ; Si_3Cl_8	NH_3	350...600	< 0,2	0,75...1,0	–	[35]
(3) PECVD	SiH_4	NH_3/N_2	250...400	20...200	0,8...1,2	20...40	[36]
(4) HDP-CVD	SiH_4	N_2	25...400	15...90	0,6...1,0	5...15	[37]
(5) PA-ALD	SiH_2Cl_2 ; Si_2Cl_6 ; SiH_4 ; $(SiH_3)_3N$; $(SiH_3)_4Si$; $SiH_2(NH^+C_4H_9)_2$	$NH_3 (N_2, H_2)$	50...450	< 0,15	0,55...1,2	10...15	[38]
(6) Cat-CVD	SiH_4	$NH_3 (N_2, H_2)$	230...500	20...250	0,7...1,5	10...15	[39]

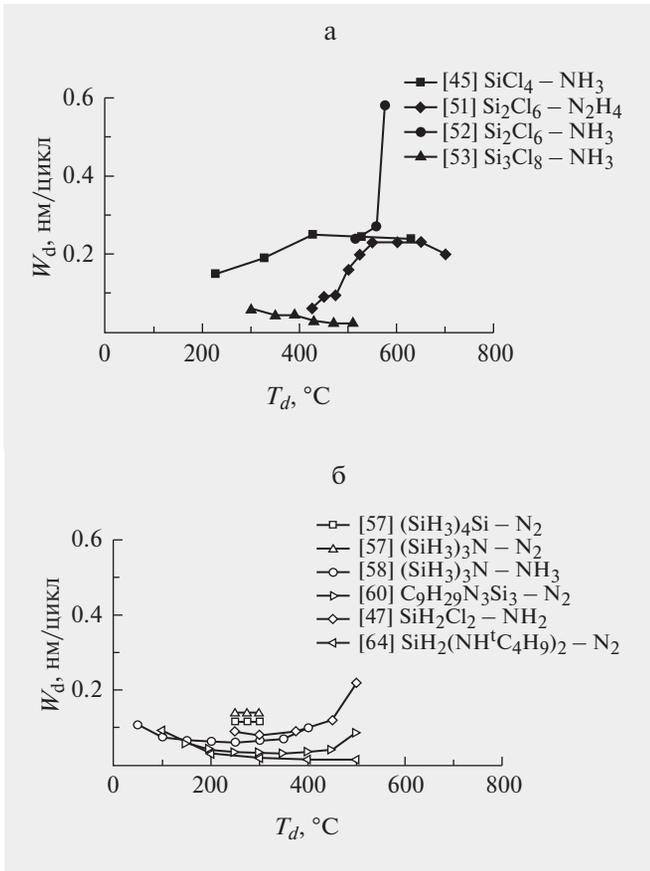


Рис. 1. Температурные зависимости для процессов ТА-АСО (а) и ПА-АСО (б) в одинаковом масштабе с указанием источников информации и химических систем.

получения ХОГФ) [40, 41]. Водород присутствует в ТСНК как связанный с кремнием (Si—H) и с азотом (N—H), а соотношение этих величин определяется условиями получения ТСНК. При последующих после получения технологических термических обработках водород может интенсивно диффундировать из ТСНК, в том числе в нижележащие узлы приборов, что оказалось критичным для ряда практических применений, см., например, [42, 43]. В табл. 1 приведены обобщенные данные о примерном диапазоне концентраций водорода в ТСНК, полученных указанными в таблице методами. Влияние водорода на основные свойства ТСНК рассмотрены в [41]. В составе ТСНК могут также присутствовать остаточные хлор и кислород, а также, в случае использования органических исходных реагентов – углерод.

Таким образом, для характеристики реального состава ТСНК в общем виде правильнее использовать общую формулу $Si_xN_yH_z$. Представления

о составе пленок можно оперативно составить по величине показателя преломления (n): для стехиометрического Si_3N_4 $n = 2.02 \pm 0.02$; значения выше соответствуют обогащению материала кремнием, значения ниже – обогащение материала, как правило, кислородом [28].

Постановка цели и задач обзора

Таким образом, исследование методов получения и характеристика соответствующих ТСНК не теряет своей актуальности по мере развития прецизионных технологий. Цель настоящей обзорной работы состоит в обзоре результатов примерно 25-летних исследований АСО ТСНК. Автор поставил перед собой задачу продолжить начатые ранее в работах [35, 38] анализ и обобщение результатов исследований ТСНК, полученных методами ТА-АСО и ПА-АСО. В настоящее время подобные обобщения отсутствуют. Важные особенности метода атомно-слоевого осаждения рассмотрены автором в работе [44] применительно к тонким слоям диоксида кремния, но полностью применимы и для АСО слоев нитрида кремния. В обзоре рассматриваются публикации только экспериментального характера.

Обобщение результатов и обсуждение

Исследования ТА-АСО: метод (2). Основные итоги исследований, как длительно применяемых микроэлектронной промышленностью хлоридов кремния $SiCl_4$ и SiH_2Cl_2 [45–50], так и новых реагентов – Si_2Cl_6 [51,52] и Si_3Cl_8 [53] кратко состоят в следующем:

1. ТА-АСО проводилось большинством авторов в интервале температур 350...550 °С с участием аммиака NH_3 и, в некоторых случаях – гидразина N_2H_4 . Температурные зависимости скорости наращивания приведены всего в четырех публикациях [45, 51–53] и, в обработке автора обзора, сведены вместе на рис. 1. Области «плато» (равномерные участки температурных зависимостей большей или меньшей протяженности на приведенных кривых) можно было бы трактовать в пользу так называемого «окна АСО», свидетельствующего о реализации режима самоограничивающейся адсорбции [21]. Однако необходимым условием для этого является подтверждение насыщения скорости осаждения по дозе прекурсоров, что не всегда имело место.

2. Характерной особенностью организации последовательно-импульсных циклических процессов АСО является исследование зависимостей скорости наращивания от величин доз реагентов. В идеаль-

ном случае такие кривые после области возрастания из нуля выходят на области плато. Однако для некоторых случаев АСО ТСНК имело место непрерывное нарастание зависимостей W_d от доз прекурсоров [50, 52, 53]. Для ТА-АСО ТСНК с типичными скоростями наращивания порядка 0,05–0,24 нм/цикл обнаружена необходимость использования аномально огромных доз обоих прекурсоров. Так, для систем $\text{SiCl}_4\text{—NH}_3$ и $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ дозы находились на уровне $10^9\text{...}10^{10}$ L (где L – единица измерения Лэнгмюр = 10^{-6} мм рт. ст. \times с, произведение давления на длительность импульса реагента). Для систем $\text{Si}_2\text{Cl}_6\text{—NH}_3$ и $\text{Si}_3\text{Cl}_8\text{—NH}_3$ дозы были примерно на два порядка меньше. В исследованных случаях дозы обеспечивались как длительностью импульсов прекурсоров (до сотен секунд), так и величиной давления в камере – до нескольких десятков тысяч паскалей. Автор в работе [38] провел оценку минимальных величин необходимых доз прекурсоров для роста ТСНК со скоростью $\sim 0,2$ нм/цикл при ТА-АСО и пришел к порядку величин $\sim 10^4$ L. Очевидно, что использование на 4...5 порядков больших величин доз относительно теоретически требуемых свидетельствует в пользу крайней неэффективности использования прекурсоров.

3. Авторами использовались различные методы подготовки подложек, но примерно в половине случаев их не указывали вообще. Выделим следующие варианты обработок, типичные для технологий ИМС:

– в [45] подложку Si(100) промывали метанолом, ацетоном и деионизованной водой, затем продували очищенным воздухом от микрочастиц, прогревали в реакторе при 600 °С в течение 1 минуты, после чего подвергали воздействию плазмы H_2O для удаления углерода. В итоге такая обработка позволяла получить SiO_2 толщиной около 2 нм с гидроксильной поверхностью SiOH^* (прием известный как «ОН-терминирование», «ОН-termination»);

– авторы [46] использовали легированные бором подложки Si(001) и проводили обработку поверхности в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ с пропорцией 0.15:3:7 при 80 °С в течение 10 минут с последующим терминированием поверхности водородом («Н-терминирование») в растворе разбавленной до 0,5% фтористоводородной кислоты («diluted HF», DHF) для предотвращения образования естественного оксида. Авторы [47, 48] также проводили терминирование водородом поверхности легированных бором подложек Si(100) сопротивлением 10 Ом \times см перед АСО сначала

обработкой в растворе $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH} = 100:20:1$ с последующим погружением в DHF и промывкой в деионизованной воде в течение 1 минуты;

– в [49] легированные бором подложки Si(100) перед осаждением обрабатывались раствором буферизированной HF («buffered oxide etch», BOE).

4. Для всех исследованных «хлоридных» процессов АСО общим оказались достаточно высокие скорости растворения ТСНК [40], объясненные, в том числе, чувствительностью низкотемпературных слоев к кислороду атмосферы, повышенным содержанием водорода, а также взаимодействием хлоридов с аммиаком с образованием быстрорастворимого NH_4Cl (в пользу этого свидетельствуют данные о присутствии в ТСНК хлора). Как результат, авторы большинства работ делали вывод о целесообразности использования повышенных температур АСО. Это, однако, приводило фактически к исчезновению эффектов, которые могли бы трактоваться как АСО [50], в пользу протеканий реакций осаждения по обычным механизмам ХОГФ.

5. Процесс ТА-АСО в [45] описан схемой последовательных поверхностных реакций первоначально гидроксильной поверхности: $\text{SiOH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiOSiCl}_3^* + \text{HCl}$ (поверхностные группы здесь и ниже обозначены звездочками *). В ходе последующего напуска аммиака с дозой $\geq 1,8 \times 10^{10}$ L авторами предположена реакция $\text{SiOSiCl}_3^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiOSiH}_2^* + \text{HCl}$. После нескольких последовательных циклов напуска SiCl_4 и NH_3 поверхность, по мнению авторов, трансформировалась от SiO_2 к Si_3N_4 (соответствующих схем не приведено). Для объяснения схемы полного цикла роста авторы [45] предположили протекание при соответствующих импульсах SiCl_4 и NH_3 двух «полуреакций» («half-reactions»): $\text{SiNH}^* + \text{SiCl}_4 \rightarrow \text{SiNSiCl}_3^* + \text{HCl}$ и, далее, $\text{SiCl}^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH}_2^* + \text{HCl}$. На основе данной схемы для случая системы $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{—NH}_3$ авторами [49] предположен следующий вариант схемы процесса: $\text{SiNH}^* + \text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{SiNSiCl}^* + \text{SiNSiH}^* + \text{HCl}$ и, далее, трансформация поверхностных продуктов по реакции с аммиаком по следующим схемам: $\text{SiCl}^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH}^* + \text{HCl}$ и $\text{SiH}^* + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH}^* + \text{H}_2$ (отметим, что для выравнивания коэффициентов очевидным является необходимость корректировки продукта с SiNH^* на SiNH_2^* , как в [45]). В работе [25] представлена близкая, по сути, схема роста ТСНК из SiH_2Cl_2 и гидразина N_2H_4 .

Для хлорида Si_2Cl_6 схема процесса с N_2H_4 предложена в [51]. Первоначально терминированная водородом кремний-азотсодержащая поверхность при экспонировании в Si_2Cl_6 реагирует следую-

щим образом: $\text{SiN}-\text{H}_x^* + \text{Si}-\text{Cl} \rightarrow \text{SiN}-\text{Si}-\text{Cl}_y + \text{HCl}$, а при последующей экспозиции в гидразине идет превращение по реакции $\text{NSi}-\text{Cl}_y + \text{N}-\text{H} \rightarrow \text{NSi}-\text{N}-\text{H}^* + \text{HCl}$. По мнению авторов [52], при $T_d > 500^\circ\text{C}$ осаждение ТСНК из Si_2Cl_6 идет двумя путями: АСО ТСНК и азотирование кремниевой ТП – продукта параллельного термораспада Si_2Cl_6 . Начало термораспада оценено в 500°C на основании резкого возрастания скорости осаждения слоев при $T_d > 513^\circ\text{C}$.

6. В большинстве опубликованных работ отмечалось, что рост ТСНК происходил без нуклеационных задержек и с постоянной скоростью, оцениваемой по кривым возрастания толщины ТСНК от числа циклов осаждения. Однако в [48] отмечалась задержка роста ТСНК на поверхности термически отожженных слоев LPCVD нитрида кремния ввиду отсутствия поверхностных $\text{Si}-\text{H}$ связей (отсутствия H -терминирования). Действительно, данный материал имеет наименьшее содержание водорода (на уровне нескольких атомных %) среди всех изученных кремний-азот-водород содержащих материалов $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$ [41], см. табл. 1. Авторы [54] отмечали селективность роста ТСНК при использовании промежуточного высокотемпературного отжига, отметив, что на H -терминированном кремнии скорость наращивания примерно в 20 раз выше, чем для SiO_2 , не имеющем необходимых для роста поверхностных групп. Таким образом, во-первых, при исследованиях АСО ТСНК необходимо детально характеризовать поверхность образцов, а во-вторых, предполагаемые схемы процессов роста ТСНК при АСО определенно должны учитывать состояние поверхности подложек перед осаждением.

7. Немногочисленные исследования состава и стехиометрии ТА-АСО ТСНК проводилось с помощью известных методов RBS (резерфордское обратное рассеяние) [45], XPS (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, $\text{Si } 2p$, $\text{N } 1s$), [49, 50, 52] AES (Оже-электронная спектроскопия, Si LVV , N KLL [51], FTIR (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье) [51]; поверхность ТСНК исследовалась методом АФМ (атомно-силовая микроскопия) [45, 46, 47, 51]. Сравнительные данные о стехиометрии ТА-АСО ТСНК приведены в табл. 1; суммированные данные о свойствах ТСНК приведены в [40, 41].

Исследования ПА-АСО: метод (5). Для плазменной активации процессов АСО ТСНК использовались различные типы реакторов, подробно рассмотренные в [38]. К основным можно отнести реакторы диодного типа с «плазмой прямого действия, ППД» (“direct plasma”), в которых осаж-

дение происходит непосредственно в области образца-подложки, а также реакторы с «удаленной плазмой» (“remote plasma”), в которых образец располагается на некотором расстоянии от источника плазмы. Исследовались реагенты следующих классов:

- силаны (моносилан SiH_4 [55, 56]), его производное неопентасилан $(\text{SiH}_3)_4\text{Si}$ [57], Si_3H_8 [61];
- хлорпроизводные силанов (SiH_2Cl_2 [47, 62], SiH_3Cl [62]; Si_2Cl_6 [63]);
- амины (и, прежде всего, трисилиламин $(\text{SiH}_3)_3\text{N}$ [57–59] и его производные [60], в состав которых входит атом азота, напрямую связанный с атомами кремния);
- органические прекурсоры [64], из которых наиболее объемные исследования ПА-АСО проведены из бис-трет-бутиламиносилана $\text{SiH}_2(\text{NH}^t\text{C}_4\text{H}_9)_2$;
- в качестве азотсодержащих источников использовались, в основном, активированные NH_3 и N_2 , иногда с участием H_2 .

Краткие результаты могут быть систематизированы следующим образом:

1. Область температур ПА-АСО несколько ниже, чем для ТА-АСО. При этом результаты исследований температурных зависимостей приведены всего в нескольких работах [47, 57, 58, 60, 64], рис. 1, б. Сравнение данных указывает на примерно вдвое меньшие скорости наращивания в областях плато, которые можно трактовать как «окна АСО», а также на существенно более низкотемпературное расположение этих областей ($\sim 200\text{--}450^\circ\text{C}$). Кроме того, при понижении температуры от температуры начала области «плато» скорости осаждения возрастают. Согласно литературе [21], это свидетельствует в пользу эффектов конденсации, вызывающих сильные изменения состава и свойств ТСНК, см., например, [64]. Этот эффект может отрицательно сказаться на качестве процесса при его реализации в реакторах с холодными стенками с температурой ниже температур подложки, на которых может происходить конденсация и, как следствие, загрязнение осаждаемого материала продуктами реакции на стенках.

2. Экспериментальные кривые влияния доз прекурсоров на скорость осаждения приведены не во всех публикациях. По приведенным данным дозы прекурсоров для достижения W_d порядка $0,025\text{--}0,15$ нм/цикл составили на несколько порядков величин меньше, чем таковые для ТА-АСО. Большинство авторов отмечали отсутствие нуклеационных задержек и постоянность величин скоростей наращивания.

Таблица 2. Данные о конформности осаждения ТСНК методами атомно-слоевого осаждения

Метод	Реагенты	$T_d, ^\circ\text{C}$	Тип структуры	H, мкм	$G_{\text{верх}}, \text{мкм}$	$G_{\text{низ}}, \text{мкм}$	AR	$SC, \text{мкм}^{-1}$	Conf. %	Ссылка
TA-ALD	$\text{Si}_3\text{Cl}_8-\text{NH}_3$	510	Наклон	8,6	0,14	0,11	60	~500	83	[53]
PA-ALD	$\text{SiH}_4-\text{N}_2^*$	250–400	Наклон	0,17	0,064	0,044	3,8	88	50	[56]
	$(\text{SiH}_3)_4\text{Si}-\text{N}_2^*$	275	Вертикаль	1,4	0,35	0,35	4	~11,4	35**	[57]
	$\text{C}_9\text{H}_{29}\text{N}_3\text{Si}_3-\text{N}_2^*$	300	Наклон	0,4	0,075	0,04	5,3	133	80 (73**)	[60]
	$\text{SiH}_2[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_2-\text{N}_2^*$	300	Наклон	0,4	0,075	0,04	5,3	133	80 (57**)	[60]
	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2-\text{NH}_3^*$	500	Спейсер	0,05	–	–	–	–	100	[62]
	$\text{Si}_2\text{Cl}_6-\text{NH}_3^*$	400	Наклон	0,4	0,13	0,1	4	40	100	[63]
	$(\text{SiH}_3)_3\text{N}-\text{H}_2/\text{N}_2^*$	300–400	Спейсер	0,075	–	–	–	–	85	[66,67]

Примечания: * – активация второго компонента реакции плазмой;

** – конформность на боковой стенке структуры примерно на середине канавки, в остальных случаях – на дне канавки

3. Информации о предварительной подготовке поверхности подложек немного; использовались те же принятые в микроэлектронике обработки, что рассмотрены выше. Для ПА-АСО использовались подложки кремния, как с естественным оксидом, так и с удаленным [47, 58, 59, 62]; Н-терминирование упоминается в [47], обработка в плазме азота перед ПА-АСО (терминирование азотом) в [55, 60]. Предполагалось, что в последнем случае формируется монослой азота с активными связями. Насыщение по активированному азоту имело место при импульсе длительностью более 60 с, а при напуске SiH_4 [54, 55] происходит его присоединение к азоту с образованием Si–N связей и N–H связей. При следующем цикле напуска плазмоактивированного азота происходит удаление связей N–H и их замещение на связи Si–N.

4. Использование удаленной плазмы позволяет существенно расширить возможности применения аппаратуры. Так, авторы работ [61, 62] предложили для получения ТСНК использовать трубчатые групповые реакторы, аналогичные РНД ХОГФ. Для этого вне трубы были установлены генераторы для активации аммиака в смеси с азотом перед его подачей в реакторы. В одном случае использовали Si_3H_8 , выращивая при 410...450 °С тонкий слой кремния с последующим его азотированием [61], в другом случае использовали SiH_2Cl_2 и плазмоактивированную азот-аммиачную смесь [62] при температурах 400...600 °С.

5. Схем плазменных процессов АСО в литературе не найдено.

6. Плазменное осаждение позволяет использо-

вать для получения ТСНК также и органические прекурсоры, однако объем опубликованных экспериментальных данных мал, а результаты неполны [64]. При ПА-АСО из $(\text{NH}^+\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{SiH}_2$ и удаленной плазмы аммиака, азота и водорода отмечено блокирование водородом (из NH_3 , H_2) активных мест поверхности (Н-терминирование). Это вызывало снижение скорости осаждения, но при использовании только азотной плазмы достигались максимальные величины скорости осаждения. С ростом температуры в интервале 100...500 °С скорость наращивания снижалась в пределах 0,09...0,015 нм/цикл, рис. 1, б, а концентрация нежелательного встроенного в материал углерода снижалась от 25 до 2 ат.%. Кроме того, насыщение скорости осаждения по дозе прекурсора не происходило.

7. Для исследования состава и свойств ПА-АСО ТСНК использовались вышеупомянутые методы анализа: RBS [59, 65], XPS [57, 58, 64], AES [58], поверхность исследовалась методом AFM [47, 58]. Для исследований ПА-АСО ТСНК активно применялся метод FTIR [55, 56, 63], с помощью которого кроме связей Si–N исследовались связи Si–H (в области ~2200 см^{-1}) и N–H (~3300 см^{-1}). Результаты исследований состава ТСНК приведены в табл. 1, в сравнении с другими методами получения слоев. Можно видеть, что при ПА-АСО имеют место в целом большие отклонения состава ТСНК от стехиометрии в пользу обогащения кремнием и водородом, чем это отмечалось для ТА-АСО. Сравнение результатов ПА-АСО с методами (2), (3) могут быть найдены в [38, 40, 41].

Исследования конформности осаждения ТСНК при АСО. Найденные данные относительно конформности осаждения на ступенчатых рельефах сведены в табл. 2. Данные приведены для структур с наклонными ~ 85 градусов, или вертикальными стенками, или спейсеров. Обозначения для структур: Н – глубина (мкм), $G_{\text{верх}}$ и $G_{\text{низ}}$ – ширина канавки сверху и снизу, соответственно (мкм), AR – безразмерная величина аспектного отношения ($AR = H/G$), SC – сложность структуры ($SC = H/G^2$ (мкм $^{-1}$), пояснения см. в [18,19]).

Для ТА-АСО информация представлена в единственной работе [53] для достаточно сложной высокоаспектной вертикальной канавки с наклонными стенками, конформность для которой найдена на уровне 83%. Ввиду изложенных выше недостатков ТА-АСО, большая часть исследований была посвящена ПА-АСО. Сравнительные данные по конформности для различных типов структур в табл. 2 показывают, что для несложных структур спейсеров конформность составляет 100%, в то время как для PECVD ТСНК – на уровне 65% [62]. Для более сложных структур конформность снижается, но по найденным данным в большинстве случаев составляет не ниже 50%, что может быть приемлемо в ряде практических применений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При ТА-АСО с использованием промышленных реагентов $SiCl_4$, SiH_2Cl_2 , Si_2Cl_6 , Si_3Cl_8 возможно снижение температуры процессов ТСНК на ~ 200 °С относительно промышленных процессов ХОГФ в РНД, но не ниже 500 °С. При этом необходимо учитывать возможность протекания реакций термораспада исходных кремнийсодержащих реагентов с азотированием образовавшегося с аморфного кремния, что приводит к изменениям стехиометрии покрытий в пользу обогащения кремнием. Особенностью процессов является необходимость очень больших импульсных доз реагентов (высокого давления или длительности импульса), что не является приемлемым для промышленного использования таких процессов.

2. ПА-АСО позволяет получать ТСНК при температурах 200...400 °С из прекурсоров неорганической природы (силаны, хлорпроизводные силанов, амины) и органических веществ, например, $(NH_4)_2SiH_2$, что расширяет возможности потенциального применения метода. При ПА-АСО необходимые дозы прекурсоров в сравнении с ТА-АСО оказались на несколько порядков величин меньше. Это свидетельствует в пользу боль-

шей эффективности таких процессов для серийного производства. Однако необходимо учитывать проблемы с применением плазменных процессов для современных приборов с развитыми трехмерными структурами ввиду известной проблемы недостаточно хорошей конформности покрытий [65], что может существенно ограничить использование ПА-АСО в реальных технологиях. Характеристики ПА-АСО ТСНК в целом отвечают требованиям производства ИМС, однако необходимо отметить, что, несмотря на многолетние попытки внедрения органических прекурсоров в производство ИМС их, скорее, можно считать неудавшимися в тех случаях, когда имеются приемлемые прекурсоры неорганической природы. Причиной этого является присутствие в слоях нежелательных примесей углерода.

3. Касательно собственно методов ТА-АСО и ПА-АСО, необходимо отметить следующее. Проблемы получения ТСНК отмечались ранее, например, в [22] объяснялись низкой реакционной способностью прекурсоров в отношении аммиака при пониженной температуре процессов. Помимо этого ключевым, до сих пор недостаточно исследованным и не систематизированным вопросом получения качественных покрытий ТСНК, является подготовка поверхности образцов (химическая обработка, терминирование и т.д.). Этот вопрос, очевидно, требует внимания и дальнейших исследований и связывания с закономерностями роста ТСНК. Из проанализированных публикаций возможный рост ТСНК в режиме АСО можно считать вероятным лишь в некоторых выделенных случаях, требующих экспериментального подтверждения. Однако здесь необходимо отметить, что как аппаратура, так и методология проведения процессов АСО значительно отличались и, к сожалению, во многих случаях их детальное изложение просто игнорировалось авторами. Прежде всего, это относится к организации цикла осаждения, когда авторами не подтверждается полное удаление прекурсоров после их отключения и, таким образом, не исключается возможность взаимодействия в газовой фазе одного прекурсора с остатками другого; в особенности это актуально для процессов, где используются короткие импульсы прекурсоров и продувочных газов. В связи с отсутствием информации аппаратурно-методологического характера, для исключения не адекватной трактовки автор в настоящем обзоре не касался вопросов исследований электрофизических свойств ТСНК, напрямую связанных с методологией получения тонкослойных материалов.

4. В настоящее время данных о структуре ТСНК, полученных методами АСО, в литературе не обнаружено. Обобщение литературы показывает возможности больших вариаций стехиометрии, в основном при плазменной активации АСО. Атомной структуре аморфного нестехиометрического нитрида кремния посвящена работа [68], которая может послужить базой для будущих исследований подобного рода.

5. Априори конформного осаждения ТСНК при АСО не наблюдается. Существенное влияние оказывает сложность структур. Кроме того, известны проблемы с ухудшением конформности осаждения при ПА-АСО [32,69]. Для случая ТСНК это имеет важное значение, поскольку в основном такие пленки получают именно с плазменной активацией процессов АСО.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Morris P.R.** A History of the World Semiconductors / IET History of Technology Series, vol. 12. – UK, London: The Institution of Engineering and Technology, 2008, 171 pages.
2. **Gardini P.A.** Roadmap Evolution: from NTRS to ITRS, from ITRS2.0 to IRDS // Proc. SPIE International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography, 2017, vol. 10450, paper No. 1045018, 15 pages.
3. **Electronic Materials and Processes Handbook.** 3rd edition. Edited by Harper C.A. – McGraw-Hill, 2003, 800 pages.
4. **Wolf S., Tauber R.N.** Silicon Processing for the VLSI Era”. Vol. 1. “Process Technology”. – US, Sunset Beach: Lattice Press, 1986, 660 pages.
5. VLSI Technology, 2nd edition. Edited by Sze S.M. – McGraw-Hill Int. Edition, 1988, 676 pages.
6. ULSI Technology. Edited by Chang C.Y. and Sze S.M. – McGraw-Hill Int. Edition, 1996, 726 pages.
7. **Quirk M., Serda J.** Semiconductor Manufacturing Technology – US, Prentice Hall, 2000, 666 pages.
8. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition. Ed. Nishi Y., Doering R. – CRC Press, 2007, 1722 pages.
9. **Sherman A.** Chemical Vapor Deposition for Microelectronics. Principles, Technology, and Applications – 1987, 215 pages.
10. **Morosanu C.E.** Thin Films by Chemical Vapor Deposition / Thin Films Science and Technology Series, vol. 7, Edited by Siddall G. – Elsevier, 1990, 718 pages.
11. **Sivaram S.** Chemical Vapor Deposition (Thermal and Plasma Deposition of Electronic Materials) – Springer Science+Business Media LLC, 1995, 292 pages.
12. **Pierson H.O.** Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD). Principles, Technology, and Applications. 2nd Edition – Noyes Publications, 1999, 425 pages.
13. **Dobkin D.M., Zuraw M.K.** Principles of Chemical Vapor Deposition – Springer Science + Business Media Dordrecht, 2003, 273 pages.
14. Chemical Vapor Deposition. Precursors, Processes and Applications. Edited by Jones A.C., Hitchman M.L., – RCS publishing, 2009, 582 pages.
15. Handbook of Thin Film Deposition. Techniques, Processes, and Technologies. 4th Edition. Edited by Seshan K. – Elsevier, 2018, 448 pages.
16. Chemical Vapor Deposition (CVD): Advances, Technology, and Applications / Series in Material Sciences and Engineering. Edited by Choy K.L. – CRC Press, 2019, 398 pages.
17. **May G.S., Spanos C.J.** Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control – John Wiley and Sons, 2006, 463 pages.
18. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience – US, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014, 314 pages.
19. **Васильев В.Ю.** Тренды развития методов химического осаждения из газовой фазы тонкопленочных материалов для прецизионных технологий // Нано- и микросистемная техника, 2014, № 9, С. 37–44.
20. **Ritala M., Leskelä M.** Atomic Layer Deposition / in Handbook of Thin Film Materials. Vol. 1. Nalwa H.S. Ed. Academic Press. San Diego. 2001. P. 103–159.
21. **George S.M.** Atomic Layer Deposition: An Overview // Chem. Rev. 2010. Vol. 110, N. 1. P. 111–131.
22. Atomic Layer Deposition of Nanostructured Materials. Edited by Pinna N. and Knez M. – Wiley-VCH, 2012, 435 pages.
23. **Kääriäinen T., Cameron D., Kääriäinen M.-L., Sherman A.** Atomic Layer Deposition. Principles, Characteristics, and Nanotechnology Applications. 2nd Edition. – Scrivener Publishing LLC, 2013, 253 pages.

24. Atomic Layer Deposition for Semiconductors. Edited by Hwang C.S., Yoo C.Y. – Springer, 2014, 263 pages.
25. **Johnson R.W., Hultqvist A., Bent S.F.** A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications // *Materials today*. 2014. V. 17. N. 5. P. 236–246.
26. Atomic Layer Deposition in Energy Conversion Applications. Edited by Bachmann J. – Wiley-VCH, 2017, 281 pages.
27. **Morosanu C.E.** The Preparation, Characterization and Application of Silicon Nitride Films // *Thin Solid Films*. 1980. V. 65. N 1/2. P. 171–208.
28. Silicon nitride in Electronics // Edited by Rzhanov A.V.: Elsevier Science Publishers B.V. 1988. 263 p.
29. Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry. Silicon Supplement Volume B5 c. Silicon Nitride in Microelectronics and Solar Cells // Edited by Pebler A.: 8th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1991, 401 p.
30. **Stoffel A., Kovacs f., Kronast W., Muller B.** LPCVD against PECVD for micromechanical applications // *J. Micromech. Microeng.* 1996. V. 6. N 1, P. 1–13.
31. **Гриценко В.А.** Электронная структура нитрида кремния // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182, № 5. С. 531–541.
32. **Xin Meng, Buyn Y.-C., Kim H.S., et al.** Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks // *Materials*. 2016. N9. Article ID1007. 20 pages.
33. **Kaloyeros A.E., Jove F.A., Jonathan Goff, et al.** Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications // *ECS J. of Solid State Sci. and Technol.* 2017. V. 6. N 10. P. P691-P714.
34. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 5. С. 287–296.
35. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 2. Термически активированные процессы в реакторах циклического действия // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 6. С. 329–339.
36. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 3. Плазмоактивированные процессы в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника* 2018. Т. 20, № 9. С. 542–554.
37. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 4. Процессы в проточных реакторах с активацией плазмой высокой плотности // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 10. С. 585–595.
38. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 5. Плазмоактивированные процессы в реакторах циклического действия // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 11. С. 659–675.
39. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 6. Каталитическое осаждение в проточных реакторах // *Нано- и микросистемная техника*. 2019. Т. 21, № 1. С. 3–13.
40. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 7. Обобщение информации по методам осаждения и свойствам пленок // *Нано- и микросистемная техника*. 2019. Т. 21, № 3. С. 131–142.
41. **Васильев В.Ю.** Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 8. Влияние водорода в пленках на их свойства // *Нано- и микросистемная техника*. 2019. Т. 21, № 6. С. 352–367.
42. **Tanaka M., Saida S., Mizushima I., et al.** Suppression of SiN-Induced Boron Penetration by Using SiH-Free Silicon Nitride Films Formed by Tetrachlorosilane and Ammonia // *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2002. Vol. 49, N 9. P. 1526–1531.
43. **Lee A.S., Rajagopalan M.N., Le M., et al.** Development and Characterization of a PECVD Silicon Nitride for Damascene Applications // *J. Electrochem. Soc.* 2004. Vol. 151, N 1, P. F7–F9.
44. **Васильев В.Ю.** Атомно-слоевое осаждение тонких пленок диоксида кремния для микро- и наноэлектроники. Часть 1. Постановка задач, методология осаждения пленок // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2019, вып. 4 (176), С. 54–64.
45. **Klaus J.W., Ott A.W., Dillon A.C., et al.** Atomic layer controlled growth of Si₃N₄ films using sequential surface reactions // *Surface Science*. 1998. V. 418. P. L14–L19.

46. **Nakajima A., Yoshimoto T., Kidera T., et al.** Low-temperature formation of silicon nitride gate dielectrics by atomic-layer deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. N5. P. 665-667.
47. **Goto H., Shibahara K., Yokoyama S.** Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with selflimiting mechanism // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 68. N. 23. P. 3257-3259.
48. **Yokoyama S., Ikeda N., Kajikawa K., et al.** Atomic-layer selective deposition of silicon nitride on hydrogen-terminated Si surfaces // *Appl. Surf. Sci.* 1998. Vol. 130-132. P. 352-356.
49. **Lee W.-J., Lee J.H., Park C.O., et al.** A Comparative Study on the Si Precursors for the Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films // *J. Kor. Phys. Soc.* 2004. V. 45. N. 5. P. 1352-1355.
50. **Lee W.-J., Kim U.J., Han C.-H., et al.** Characteristics of Silicon Nitride Thin Films Prepared by Using Alternating Exposures of SiH_2Cl_2 and NH_3 // *J. Kor. Phys. Soc.* 2005. V. 47. N. 11. P. S598-S602.
51. **Morishita S., Sugahara S., Matsumura M.** Atomic-layer chemical-vapor-deposition of silicon nitride // *Appl. Surf. Sci.* 1997. V. 112. P. 198-204.
52. **Park K., Yun W.-D., Choi B.-J., et al.** Growth studies and characterization of silicon nitride thin films deposited by alternating exposures to Si_2Cl_6 and NH_3 // *Thin Solid Films.* 2009. V. 517. P. 3971-3978.
53. **Riedel S., Sundqvist J., Gumprecht T.** Low temperature deposition of silicon nitride using Si_3Cl_8 // *Thin Solid Films.* 2015. V. 577. P. 114-118.
54. **Ooba K., Nakashima Y., Nakajima A., et al.** Self-Limiting Atomic-Layer Selective Deposition of Silicon Nitride by Temperature-Controlled Method // *Ext. Abstr. 1998 Int. Conf. Solid State Dev. Mater.* 1998. Hiroshima. P. 22-23.
55. **King S.W.** Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of SiN: H using N_2 and Silane // *ECS Trans.* 2010. Vol. 32. N. 2. P. 365-373.
56. **King S.W.** Plasma enhanced atomic layer deposition of SiNx: H and SiO_2 // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2011. Vol. 29. N. 4. P. 041501/1-9.
57. **Week S., Nowling G., Fuchigami N., et al.** Plasma enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using neopentasilane // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2016. Vol. 34. N.1. P. 01A140/1-6.
58. **Jang W., Jeon H., Kang C., et al.** Temperature dependence of silicon nitride deposited by remote plasma atomic layer deposition // *Phys. Status Solidi A.* 2014. Vol. 211. N. 9. P. 2166-2171.
59. **Jang W., Jeon H., Song H., et al.** The effect of plasma power on the properties of low-temperature silicon nitride deposited by RPALD for a gate spacer // *Phys. Status Solidi A.* 2015. Vol. 212. N. 12. P. 2785-2790.
60. **Park J.-M., Jang S.J., Yusup L., et al.** Plasma-enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using novel silylamine precursor // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016. Vol. 8. N. 32. P. 20865-20871.
61. **Granneman E., Fischer P., Pierreux D., et al.** Batch ALD: Characteristics, comparison with single wafer ALD, and examples // *Surf. Coat. Technol.* 2007. V. 201. P. 8899-8907.
62. **Koehler F., Triyoso D.H., Hussain I., et al.** Atomic Layer Deposition of SiN for spacer applications in high-end logic devices // *IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng.* 2012. Vol. 41. Article № 012006 (4 pages).
63. **Ovanesyan R.A., Hausmann D.M., Agarwal S.** Low-Temperature Conformal Atomic Layer Deposition of SiN_x Films Using Si_2Cl_6 and NH_3 Plasma // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. Vol. 7. N. 202. P. 10806-10813.
64. **Knoops H.C.M., Braeken E.M.J, de Peuter K., et al.** Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride from Bis(tertbutylamino) silane and N_2 Plasma // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. Vol. 7. N. 35. P. 19857-19862.
65. **Knoops H.C.M., Langereis E., Van de Sanden M.C.M., Kessels W.M.M.** Conformality of Plasma-Assisted ALD: Physical Processes and Modelling // *J. Electrochem. Soc.* 2010. Vol. 157. N12. P. G241-G249.
66. **Triyoso D.H., Jaschke V., Shu J., et al.** Robust PEALD SiN spacer for gate first high-k metal gate integration // *Proc. 2012 Int. Conf. on ALD, 12851120* (4 pages).
67. **Triyoso D.H., K. Hempel K., S. Ohsiek S., et al.** Evaluation of Low Temperature Silicon Nitride Spacer for High-k Metal Gate Integration // *ECS J. of Sol. State. Sci. Technol.* 2013. Vol. 2. N. 11, p. N222-N227.
68. **Гриценко В.А.** Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния // *Успехи физических наук.* 2008. Т. 178, № 7. С. 727-737.
69. **Profijt H.B., Potts S.E., van de Sanden M.C.M., et al.** Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2011. Vol. 29, N. 5. P. 050801-050826.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ТРАНСПОРТА ЗАРЯДА В БЕСФОРМОВОЧНОМ МЕМРИСТОРЕ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ МЕТАЛЛА ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА

► Г.Я. Красников, О.М. Орлов, В.В. Макеев
АО «НИИМЭ»

Мемристорная резистивная память с произвольным доступом (ReRAM, Resistive Random Access Memory) вместе с памятью с изменением фазового состояния (PCM, Phase Change Memory), магнеторезистивной памятью с произвольным доступом (MRAM, Magnetoresistive Random Access Memory), сегнетоэлектрической памятью (FeRAM, Ferroelectric Memories) [4] являются востребованными видами энергонезависимой памяти на новых альтернативных принципах. Нитрид кремния является перспективным резистивным переключающим слоем для мемристоров. В данной работе проведено экспериментальное исследование эффекта переключения и переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния для разных типов металла (Ni, Co, Cu) верхнего электрода.

RESEARCH OF THE SWITCHING EFFECT AND CHARGE TRANSPORT IN THE FORMING-FREE MEMORISTOR BASED ON SILICON NITRIDE WITH VARIOUS TYPES OF TOP ELECTRODE METAL

G.Ya. Krasnikov, Oleg M. Orlov, V.V. Makeev

«МЕРИ», SC

Memkistor resistive random access memory (ReRAM) together phase change memory (PCM), magnetoresistive random access memory (MRAM), ferroelectric memory (FeRAM) are popular types of new alternative principles non-volatile memory. Silicon nitride is a promising resistive switching layer for memristors. In this work we conducted an experimental researches of the switching effect and charge transport in memristores based on silicon nitride for various types of metal of the top electrode (Ni, Co, Cu).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мемристорная резистивная память с произвольным доступом ReRAM (Resistive Random Access Memory) разрабатывается для энергонезависимой памяти (Non-Volatile Memory, NVM) следующего поколения после флэш-памяти (Flash). Как известно, оксид кремния (SiO_2) и нитрид кремния (Si_3N_4) составляют основу КМОП-тех-

нологии [1–3]. При этом, в отличие от оксида кремния, нитрид кремния имеет высокую концентрацию электронных ловушек и поэтому широко используется в качестве среды хранения связанного заряда [4] на ловушках во флэш-памяти. Необходимо отметить, что ReRAM вместе с памятью с изменением фазового состояния PCM (Phase Change

Memory), магниторезистивной памятью с произвольным доступом MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory), сегнетоэлектрической памятью FeRAM (Ferroelectric Memories) [5] являются востребованными видами энергонезависимой памяти на новых альтернативных принципах в сравнении с памятью на основе хранения заряда. Память FeRAM основана на сохранении остаточной поляризации при отсутствии поля и возможности переполяризации сегнетоэлектрика при изменении полярности внешнего электрического поля [6]. В связи с потенциальной возможностью уменьшения толщины сегнетоэлектрического слоя (до нескольких нанометров) влияние размерных эффектов значительно снижается. Использование тонкого 10 нм сегнетоэлектрического слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ вместо традиционных перовскитов (PZT, SBT) позволяет уменьшать топологические размеры конденсатора, избежав влияния краевых эффектов, а удельное значение остаточной поляризации сохраняется вплоть до размеров $0,03 \times 0,03 \text{ мкм}^2$ [6]. При уменьшении размеров элемента хранения уменьшается и абсолютное значение импульса тока, протекающего при перезаписи ячейки памяти, поэтому уменьшение размеров элемента хранения возможно до тех пор, пока остается возможным детектирование состояний «0» и «1» разработанными схемами считывания.

Для FeRAM происходит потеря информации при считывании, и необходимо производить перезапись информации после каждой операции чтения (так называемое деструктивное считывание). Этот недостаток отсутствует в ReRAM памяти. Принцип функционирования мемристора (ReRAM память) основан на переключении диэлектрической активной среды между логическими состояниями с высоким резистивным состоянием (High Resistance State – HRS) и низким резистивным состоянием (Low Resistance State – LRS). В настоящее время изучаются в качестве активной среды различные нестехиометрические диэлектрики, такие как оксид гафния (HfO_x), оксид циркония (ZrO_x), оксид тантала (TaO_x), оксид ванадия (VO_x), оксид молибдена (MoO_x), оксид алюминия (AlO_x), оксид ниобия (NbO_x) и оксид кремния (SiO_x). В настоящее время отмечено, что Si_3N_4 является перспективным резистивным переключающим слоем благодаря его большому количеству ловушек для приложений NVM [7–9].

Механизм переноса заряда в структуре МНОП: металл–нитрид–оксид–кремний с толстым слоем Si_3N_4 был исследован в работе [10]. Такая структура

не проявляла мемристорных свойств, и основным механизмом для переноса заряда была модель многофононной ионизации изолированных ловушек. Механизм переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния в низкоомном состоянии (LRS) был изучен в работах [11, 12]. В слабых электрических полях перенос заряда интерпретируется на основе эффекта Френкеля. В сильных полях перенос заряда интерпретируется в терминах туннельного эффекта Фаулера–Нордгейма. В работе [13] перенос заряда в состоянии LRS в нитриде кремния интерпретируется моделью на основе эффекта Шоттки.

Для мемристоров Ni / SiN_x / p++ Si в состоянии высокого сопротивления (HRS) с различными значениями параметра x механизм переноса заряда был изучен в работе [14]. Перенос заряда интерпретируется в рамках модели Френкеля. В работе [15] перенос заряда в состоянии LRS интерпретировался с точки зрения модели эффекта Шоттки. Механизм транспорта заряда в нитриде кремния в состояниях LRS и HRS был изучен в работах [16, 17]. Перенос заряда интерпретируется на основе модели тока с ограниченным пространственным зарядом, без подробного обсуждения параметров модели. Предварительные результаты исследований [18] показали целесообразность применения модели тока с ограниченным пространственным зарядом.

Однако в настоящее время не существует единой универсальной модели переноса заряда в мемристоре на основе Si_3N_4 . В работе [17] механизм переноса заряда в мемристоре на основе PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition или плазмохимическое осаждение) SiN_x представляет собой фонон-облегченное туннелирование между ловушками.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффекта переключения и переноса заряда в МНОП-мемристоре для разных типов металла (Ni, Co, Cu) верхнего электрода, обсуждение предполагаемых параметров для проведения моделирования переноса заряда в МНОП-мемристоре для состояний LRS и HRS на основе применения модели тока с ограниченным пространственным зарядом.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследуемого механизма переноса заряда в МНОП-мемристоре с тонким слоем Si_3N_4 нами была изготовлена структура Ni / Si_3N_4 / SiO_2 / p+Si. Использовалась кремниевая подложка p типа с сопротивлением $11,5 \text{ Ом} \times \text{см}$. Слой термического оксида SiO_2 толщиной 2 нм был сформирован путем

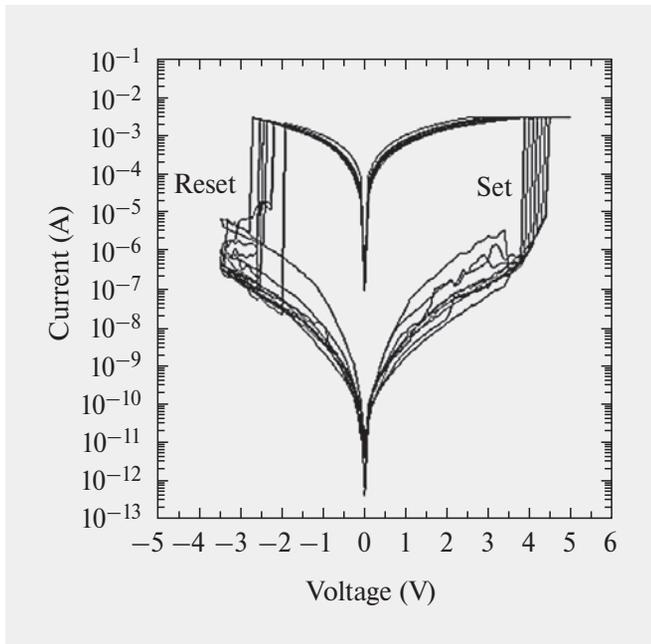


Рис. 1. Петля переключений (voltage sweep) HRS-LRS с 10 циклами для ReRAM на основе Si_3N_4 для Ni электрода

термического окисления. Затем для резистивного переключающего слоя была нанесена пленка Si_3N_4 толщиной 4 нм с помощью химического осаждения из паровой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) при 700°C с использованием смеси дихлорсилана (SiH_2Cl_2) и аммиака (NH_3) (в соотношении $\sim 1 : 3$). Ионная имплантация (BF_2^+ с энергией 40 кэВ и дозой $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) была выполнена через полученные слои для формирования высоколегированного слоя p-типа в подложке. После имплантации был проведен быстрый термический отжиг при 1030°C .

В финале с использованием теневой маски был нанесен с помощью термического испарителя верхний электрод (толщиной около 100 нм) из таких металлов, как никель (Ni), кобальт (Co), медь (Cu) на соответствующие образцы. Диаметр электрода составлял 200 мкм для первой группы образцов с никелем. Диаметр электрода составлял 300 мкм для второй группы образцов с никелем (Ni), кобальтом (Co), медью (Cu) соответственно. Вольт-амперные характеристики измерялись полупроводниковым анализатором параметров Agilent B1500A. Нижний электрод (p-Si) был заземлен во время измерения. С помощью измерительной системы для контроля толщин диэлектриков Opti-Probe 7341XP фирмы KLA методом абсолютной эллипсо-

метрии (эллипсометр с HeNe лазером, длина волны 632,8 нм) для простой оптической модели: Si-SiO₂ ($n = 1,46$), Si-Si₃N₄ ($n = 2,00$) были измерены толщины диэлектриков оксида кремния и нитрида кремния на кремниевых подложках соответственно, диэлектрические слои изготовлены с высокой однородностью. Для оксида кремния: среднее значение толщины 1,9 нм и разброс толщины менее 3%. Для нитрида кремния: среднее значение толщины 4,4 нм и разброс толщины менее 3%.

На рис. 1 показано, что типичное биполярное резистивное переключение с 10 циклами наблюдается в нашей изготовленной структуре МНОП-мемристора с никелевым электродом. Диаметр электрода составлял 200 мкм. Устройство было установлено в состояние включения (set) в соответствии с текущим ограничением тока (Compliance Current, CC) 3mA, чтобы предотвратить постоянный пробой диэлектрика. Далее для процесса выключения (reset) использовалось также ограничение тока (CC) 3mA. Положительное смещение приводит к переключению (set), при котором устройство переключается из состояния HRS в состояние LRS. Изготовленная структура МНОП без формовки демонстрирует воспроизводимое биполярное переключение. Дополнительные исследования образцов второй группы показали, что рабочее напряжение находилось в пределах 3,0 ~ 4,3 В (рис. 2) в течение заданного процесса. Для структуры с Ni в качестве верхнего электрода $V_{\text{set}} = 4.3 \text{ В}$, $V_{\text{reset}} = -2,7 \text{ В}$,

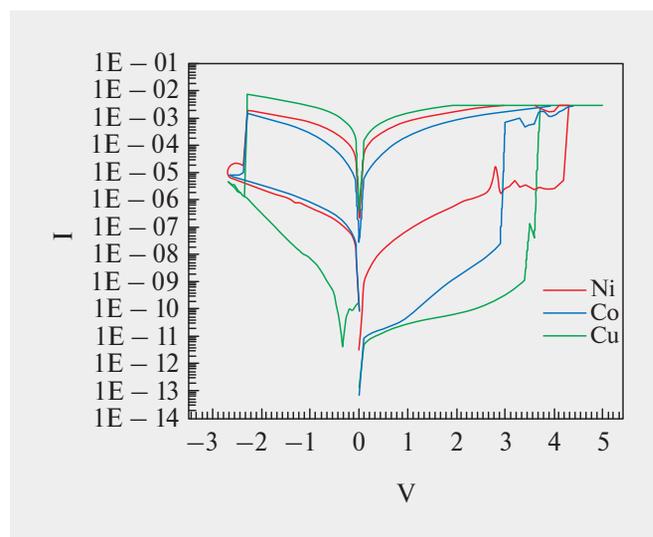


Рис. 2. Петля переключений (voltage sweep, 1 цикл) HRS-LRS для ReRAM на основе Si_3N_4 для Ni, Co, Cu электродов соответственно

Таблица 1. Сравнение основных параметров МНОП-мемристоров с разными верхними электродами Ni, Co, Cu соответственно

Материал верхнего электрода	V_{set}	V_{reset}	$I_{comp\ set}$	$I_{comp\ reset}$
Ni	4,3	-2.7 V	3 mA	3 mA
Co	3	-2.7 V	3 mA	5 mA
Cu	3,6	-2.7 V	3 mA	10 mA

для Co в качестве верхнего электрода $V_{set} = 3$ В, $V_{reset} = -2.7$ В, для Cu в качестве верхнего электрода $V_{set} = 3.6$ В, $V_{reset} = -2.7$ В (табл. 1). После 3 циклов параметры V_{set} и V_{reset} оставались стабильными. Окно памяти (memory window) для Ni составило около 4–5 порядков, для Co – около 6 порядков, для Cu – около 7 порядков. Основные параметры ВАХ и переключения мемристоров с верхним электродом из разных металлов близки ($V_{set} = 3-4,3$ В, $V_{reset} = -2,7$ В) и сильно зависят от технологии изготовления активного слоя МНОП-мемристора. Следует отметить, что ток утечки достаточно мал при комнатной температуре в исходном состоянии.

Механизм переноса заряда и свойства накопления заряда в мемристоре сильно зависят от технологии изготовления активного слоя мемристора. Толщина оксида и нитрида кремния сопоставима с МНОП [7], но из-за другой технологии изготовления окно памяти изготовленных МНОП-структур больше и не требует процедуры формовки.

При исследовании транспорта заряда в МНОП-структуре для выбранной модели тока с ограниченным пространственным зарядом (SCLC) необходимо обратить внимание на то, что модель SCLC имеет много параметров. Некоторые параметры можно взять из опубликованных данных для уменьшения количества переменных параметров. На основе типичных значений параметров для Si_3N_4 [19–21] можно взять значения статической диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 7$) и эффективной массы ($m^* = 0,5m_e$). Значение параметра θ , отвечающего за долю свободных электронов по отношению ко всем инжектированным носителям на основе экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик МНОП-структур с Ni электродом в состоянии LRS, слабо зависящих от температуры, можно выбрать $\theta = 1$. Для состояния LRS в МНОП-структуре предлагается использовать модель проводимости филамента

на основе аморфного кремния с подвижностью $\mu = 1 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с})$. Но при этом следует отметить, что природа проводящего филамента ближе к полупроводнику, чем к металлу, так как в омической части вольт-амперной характеристики ток увеличивается с ростом температуры.

Для МНОП-мемристора с никелевым электродом (образцы первой группы), функционирующего без формовки на основе экспериментальных исследований, для состояния HRS можно принять параметр S , представляющий площадь верхнего электрода в качестве всего контакта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были получены структуры МНОП с верхним электродом из разных металлов, проявляющие мемристорные свойства. Мемристор МНОП не требует процедуры формовки. Основные параметры ВАХ и переключения мемристоров с верхним электродом из разных металлов близки ($V_{set} = 3-4,3$ В, $V_{reset} = -2,7$ В) и сильно зависят от технологии изготовления активного слоя МНОП-мемристора. Мемристор МНОП имеет окно памяти примерно 5–7 порядков. Окно памяти для Ni составило около 4–5 порядков, для Co – около 6 порядков, для Cu – около 7 порядков.

Изготовление экспериментальных образцов и экспериментальные исследования были выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-03018).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красников Г.Я., Орлов О.М.** Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 7–8. С. 124–128.
2. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов // Изд. «Техносфера». 2011.
3. **Красников Г.Я.** Исследование влияния материала верхнего электрода на свойства МДП-структур // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИЭТ, 1989. 127 с.

4. **Gritsenko V.A., Perevalov T.V., Orlov O.M. and Krasnikov G. Ya.** Nature of traps responsible for the memory effect in silicon nitride // *J. Applied Physics Letters* 109, 062904 (2016); doi: 10.1063/1.4959830
5. **Islamov D.R., Gritsenko V.A., Perevalov T.V., Pustovarov V.A., Orlov O.M., Chernikova A.G., Markeev A.M., Slesazek S., Schroeder U., Mikolajick T., Krasnikov G.Y.** *Acta Materialia*, 166 (2019). 47–55, doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.008.
6. **Orlov O.M., Markeev A.M., Zenkevich A.V., Chernikova A.G., Spiridonov M.V., Izmaylov R.A., and Gornev E.S.** Investigation of the Properties and Manufacturing Features of Nonvolatile FRAM Memory Based on Atomic Layer Deposition // *Russian Microelectronics*. 2016. Vol. 45, №. 4, P. 262–269.
7. **Jiang X.F., Ma Z.Y., Xu J., Chen K.J., Xu L., Li W., Huang X.F. and Feng D.** *Sci. Rep-Uk* 5 (2015).
8. **Kim S., Jung S., Kim M.H., Cho S. and Park B.G.** *Appl. Phys. Lett.* 106 (21) (2015).
9. **Hong S.M., Kim H.D., An H.M. and Kim T.G.** *Ieee Electr Device L.* 34 (9), 1181–1183 (2013).
10. **Nasyrov K.A., Gritsenko V.A., Kim A.K., Chae H.S., Chae S.D., Ryu W.I., Sok J.H., Lee J.W. and Kim B.M.** *Ieee Electr. Device L.* 23 (6), 336–338 (2002).
11. **Kim S., Jung S., Kim M.H., Chen Y.C., Chang Y.F., Ryoo K.C., Cho S., Lee J.H. and Park B.G.** *Small* 14 (19) (2018).
12. **Kim S., Kim H., Hwang S., Kim M.H., Chang Y.F. and Park B.G.** *ACS Applied Materials & Interfaces* 9 (46). 40420–40427 (2017).
13. **Kim S., Chang Y.F. and Park B.G.** *Rsc. Adv.* 7 (29), 17882–17888 (2017).
14. **Kim S., Chang Y.F., Kim M.H. and Park B.G.** *Appl. Phys. Lett.* 111 (3) (2017).
15. **Kim S., Cho S. and Park B.G.** *Aip Adv* 6 (1) (2016).
16. **Kim S., Jung S., Kim M.H., Kim T.H., Bang S., Cho S. and Park B.G.** *Nanotechnology* 28 (12) (2017).
17. **Tikhov S.V., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Korolev D.S., Antonov I.N., Karzanov V.V., Gorshkov O.N., Tetelbaum D.I., Karakolis P. and Dimitrakis P.** *Microelectron Eng.* 187, 134–138 (2018).
18. **Orlov O.M., Gritsenko V.A.** // Research of features bipolar resistive switching characteristics in Si₃N₄ based structure / CONFERENCE NES2019 - NEW TRENDS IN NONEQUILIBRIUM STOCHASTIC MULTISTABLE SYSTEMS AND MEMRISTORS, Book of Abstracts, OCTOBER 18–21, 2019 ERICE (ITALY), pp. 31–32.
19. **Shaposhnikov A.V., Petrov I.P., Gritsenko V.A. and Kim C.W.** *Phys. Solid. State+* 49 (9), 1628–1632 (2007).
20. **Gritsenko V.A.** *Phys. Usp.* 55 (5), 498–507 (2012).
21. **Gritsenko V.A., Meerson E.E. and Morokov Y.N.** *Physical Review B* 57 (4), R2081–R2083 (1998).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СЛОЕВ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА МИКРОРЕЛЬЕФНУЮ ПОДЛОЖКУ

► **В.Л. Евдокимов**
АО «НИИМЭ»

Предложена модель формирования профиля слоев в траншее и на гребенчатой структуре кристаллов субмикронных интегральных схем. Модель учитывает скорость поверхностной диффузии адсорбированного реагента в соотношении со скоростью его превращения в конечный продукт. Дано уравнение показателя конформности, аппроксимирующее для различных типов слоев зависимость от энергии активации химической реакции и температуры осаждения. Представлены аналитические выражения и оценки профилей для одиночной траншеи и регулярной рельефной структуры, учитывающие эффект загрузки и геометрический фактор доставки реагента.

MODELING THE TOPOLOGICAL NON - UNIFORMITY OF THE LAYERS DEPOSITED FROM THE GAS PHASE ON A SUBSTRATE MICRORELIEF

V.L. Evdokimov

«MERY», SC

A model for forming the profile of layers in the trench and on the comb structure of crystals of submicron integrated circuits is proposed. The model takes into account the rate of surface diffusion of the adsorbed reagent in relation to the rate of its transformation into the final product. An equation of the conformality index is given that approximates the dependence on the activation energy of the chemical reaction and the deposition temperature for different types of layers. Analytical expressions and estimates of profiles for a single trench and a regular relief structure are presented, taking into account the loading effect and the geometric factor of reagent delivery.

ВВЕДЕНИЕ

Транзисторные структуры интегральных схем субмикронного уровня [1], как правило, представляет собою развитый рельеф из затворов и проводников. Толщина осаждаемых слоев в зазорах и у ступенек микро рельефа обычно существенно меньше, чем на гребнях рельефа [2–5], и эта неравномерность возрастает с увеличением топологической рельефности, что составляет определенную проблему при изготовлении интегральных схем (ИС). Неравномерность еще более увеличивается из-за эффекта загрузки, (loading effect) [6], вследствие которого толщина слоя на группе рельефных элементов существенно меньше, чем на нерельефном участке

подложки. Как показано на примере одиночных ступенек при осаждении SiO_2 окислением SiH_4 [7], неравномерность наиболее выражена в условиях гомогенного роста с ограничением скорости роста диффузией продуктов реакции. И, напротив, в условиях гетерогенного роста при торможении кинетикой химической реакции на поверхности, как, например, при осаждении из тетраэтоксисилана (TEOS) с кислородом, формируется более равномерный профиль [8]. Однако для структур с субмикронным рельефом вопрос о неравномерности профиля в зазорах и эффект загрузки на развитом рельефе проанализированы недостаточно. Для прояснения закономерностей формирования

профиля и его количественной оценки на рельефных структурах необходима разработка модели, учитывающей кинетику осаждения слоев и геометрические характеристики рельефа.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

1.1. Механизм газофазного осаждения слоев достаточно подробно рассмотрен в работах [2, 3, 7–9]. С точки зрения качества слоев, предпочтительно осаждение при низком давлении и невысоких концентрациях реагента, в условиях, когда реализуется режим гетерогенного роста и отсутствует нежелательное образование продукта слоя в газовой фазе. В этом режиме слой растет преимущественно за счет образования продукта на поверхности подложки. При этом процесс может протекать в двух разновидностях. В одной из них, при достаточно быстрой диффузии реагента к поверхности относительно скорости превращения в продукт, рост определяется скоростью химической реакции (кинетическая область процесса). В другом случае, при относительной нехватке реагента на поверхности, рост определяется скоростью доставки реагента (диффузионная область) и его концентрацией на поверхности при определенной степени заполнения в адсорбированной фазе. В обоих случаях, и в кинетической области, и, тем более, в переходной, скорость роста зависит от концентрации реагента [2, 3], хотя и в меньшей мере, чем для процесса в чисто диффузионной области. При этом в траншее имеет место дефицит реагента, и процесс смещен в область ограничения доставкой реагента при невысоком заполнении поверхности. В соответствии с законом Генри для малого заполнения (этому способствует и непрерывное обновление поверхности материалом слоя), поверхностная концентрация, а значит и толщина слоя в траншее, пропорциональны потоку реагента из газового объема.

1.2. В соответствии с моделью, профиль слоя, формирующегося при низком давлении в траншее с аспектным отношением $AR = h/w$, определяется молекулярным потоком реагента к поверхности траншеи из пространства радиусом порядка длины свободного пробега ($\lambda \gg h, w$) (рис. 1). Другой составляющей определяющей профиль является диффузионное перераспределение адсорбированных молекул реагента при сопутствующем процессе его химического превращения в продукт. Способность к перераспределению реагента в процессе осаждения можно определить отношением интенсивностей (потоков, молекул/см²с) поверхностной диффузии (f_d) к потоку химического превраще-

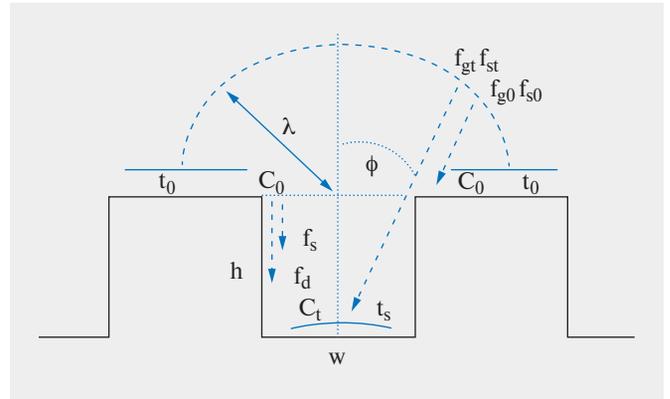


Рис. 1. Молекулярные потоки реагента к дну траншеи (f_{qt}), к гребню (f_{q0}) и скорости диффузии и химической реакции на стенках – f_d и f_s (t_0 и t_s – условные толщины слоя).

ния (f_s). Когда поверхностная диффузия реагента существенно больше расходовании на химическую реакцию, реагент распределяется по поверхности, и в траншее формируется равномерный профиль. И, напротив, когда $f_s > f_d$ профиль неравномерный, так как реагент на стенках траншеи превращается в продукт не успевая распределиться. Во втором случае профиль определяется в основном степенью экранирования потока, зависящей от геометрии траншеи. Заметим, что при гомогенном механизме роста, при котором доставляемые к поверхности молекулы продукта слоя не перераспределяются, всегда формируется неравномерный профиль. В этом случае профиль определяется только степенью экранирования потока молекул продукта (f_{st}). Для рельефных структур такие слои заведомо не приемлемы.

1.3. Эффект загрузки, как степень уменьшения толщины на рельефной площадке (t_2) относительно толщины на нерельефной (t_1), обусловлен повышенным расходом реагента на рельефе. Эффект может быть определен отношением площадей нерельефной поверхности (на участке L_1) к рельефной (участок L_2) (рис. 2). Уменьшение толщины слоя проявляется также на участке L_1 (толщина t^*) в пределах расстояния порядка толщины пограничного слоя (δ). Это связано с изменением градиента диффузии на переходном участке. Непосредственно у крайнего гребня имеет место и ближний эффект (толщина t^{**}), обусловленный экранированием реагента на расстоянии вдоль подложки порядка высоты ступеньки. Эффект загрузки имеет место и в падении толщины (t_3 и t_4) на стенках рельефа

относительно толщины на вершине гребней (t_2), что возникает вследствие геометрического экранирования потоков доставки с $\lambda \gg h$.

2. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОНФОРМНОСТИ

2.1. Введем показатель подвижности реагента $K_n = f_d / f_s$, где f_d – скорость поверхностного перераспределения (диффузии), f_s – скорость химического превращения реагента. С учетом поверхностной концентрации и, выразив скорости на единицу поверхности (молекул/см²с) как $f_d = C_0 \mu a^2 \nu_0 e^{-Q_d/RT} / z$ и $f_s = C_0 \mu \lambda_s^2 \nu_0 e^{-E_a/RT}$, получим $K_n = (a/\lambda)^2 z^{-1} e^{(E_a - Q_d)/RT}$. Физический смысл показателя следует понимать как вероятность преодоления молекулой реагента активационного барьера диффузии (Q_d) относительно вероятности преодоления барьера активации химической реакции (E_a). В этих выражениях μ – кинетический коэффициент, характеризующий подвижность молекулы, зависящий от массы, диаметра молекулы и температуры, ν_0 – частота тепловых колебаний молекулы, C_0 – поверхностная концентрация реагента (эти параметры математически сокращены в выражении для K_n), a – длина одиночного перескока диффундирующей молекулы, z (=4) – число направлений перескока, T – температура подложки, R – универсальная газовая постоянная, λ_s – длина свободного пробега молекулы на поверхности до момента взаимодействия с другой молекулой, принятая для двухмерного пространства, как $\lambda_s \approx 1/dn$, где n – поверхностная концентрация, d – сечение столкновения в двухмерном пространстве поверхностной диффузии, равное диаметру молекулы реагента.

2.2. Коэффициент конформности (K) в условиях прямой доставки реагента ($\lambda \gg h$) определяется показателем подвижности K_n вместе с геометрическим коэффициентом неравномерности доставки (K_r), как $K = K_r (1 + K_n)$, где $K_r = 2\pi^{-1} \arcsin[w(w^2 + 4h^2)^{-1/2}]$ (рис. 1).

2.3. В гомогенном режиме, когда слой формируется за счет продукта доставляемого из объема, профиль заведомо неравномерен, так как малоподвижные молекулы твердого осадка не перераспределяются при

температурах осаждения. Для этого режима профиль определяется только геометрическим фактором K_r .

2.4. Для анализа эффекта загрузки практический интерес представляют процессы в гетерогенном режиме роста с $K > 1$, которые имеют равномерную толщину в траншеях в этих условиях вследствие эффективного перераспределения реагента. Учитывая природу эффекта, определим его обратной пропорцией от отношения площадей рельефной и нерельфной поверхности на участках L_2 и L_1 , соответственно. Несложно показать, например, для структуры с одинаковой шириной вершин гребня и дна траншей, равной w , и при $L_1 = L_2 = \delta$, коэффициент загрузки $\chi = w / (w + h)$. При независимом размере рельефной площадки $L_2 \neq \delta$ и количестве траншей n на длине L_2 , $\chi = \delta / (L_2 + 2nh)$.

2.5. Для общего случая роста в переходном режиме выражение должно быть уточнено с учетом доли роста слоя в кинетической области $k = f_r / (f_r + f_d)$, тогда $\chi^* = \chi (1 + k)$. Это учитывает особенность переходного режима, состоящую в том, что доля общей толщины слоя, формирующаяся в кинетической области конформно, суммируется с долей толщины, образующейся в диффузионной области неконформно. Здесь $f_d = (C - C_s)D/\delta$, $f_r = C_s \nu e^{-E_a/RT}$, где C и C_s – концентрации на внешней и внутренней границах газового слоя δ , D – коэффициент диффузии реагента в газовом слое, ν – частота столкновений молекул реагента на поверхности.

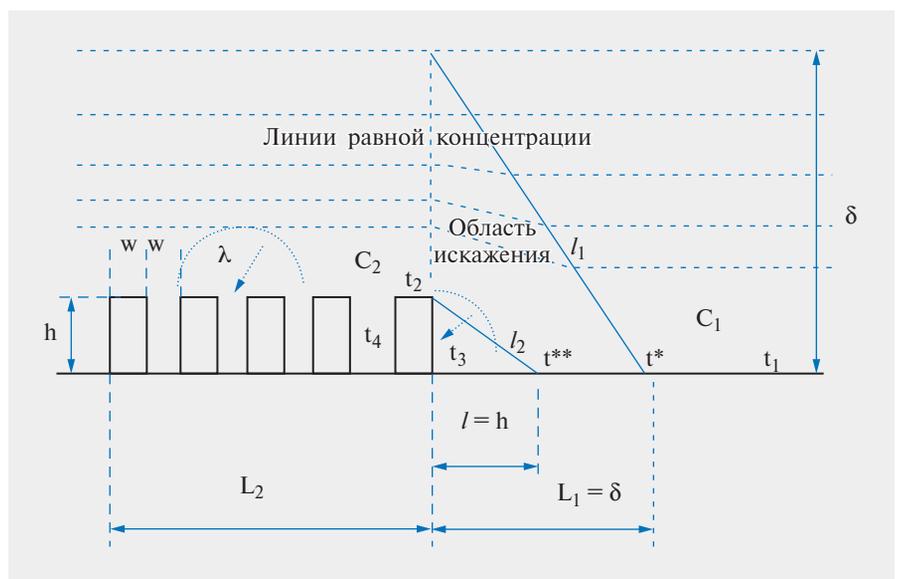


Рис. 2. Схема возникновения эффекта загрузки ($S_{\text{рельеф}} > S_1, C_2 < C_1, t_4 < t_3 < t_2 < t_1$).

2.6. Вместе с эффектом на рельефе участка L_2 , уменьшение толщины происходит и на смежном участке L_1 вследствие искажения диффузионного потока на расстоянии вдоль подложки $L_1 \approx \delta$. С учетом коэффициента загрузки и геометрического фактора искажения потока (δ/l_1), толщина на этом участке выражается как $t^* = t_1 (1 - \chi \delta/l_1) = t_1 [1 - \chi \delta (\delta^2 + L_1^2)^{0,5}]$, где l_1 – длина в направлении диффузии в газе в области искажения линий равной концентрации. Вместе с тем, у основания крайнего гребня на расстоянии l (порядка размера h) имеет место микро-эффект, возникающий вследствие экранирования бесстолкновительного потока реагента ($\lambda \gg h$). С учетом коэффициента загрузки, выразим толщину на участке l в зависимости от угла пространства доставки, как $t^{**} = \chi t_1 [1 - \pi^{-1} \arcsin (h/l_2)] = \chi t_1 [1 - \pi^{-1} \arcsin [h / (l^2 + h^2)^{0,5}]]$, где t_1 – толщина на плоском участке на расстоянии $> L_1$, l_2 – длина в направлении экранирования потока, l – расстояние от уступа, «arcsin» – угол пространства доставки (в единицах радиан). Толщина на вертикальных стенках рельефа также зависит от геометрии доставки. На внешней стенке крайнего гребня, где угловое пространство доставки равно $\pi/2$ (половина от пространства на гребне) $t_3 = 0,5 t_2$, а толщина на стенках и дне траншеи $t_4 = t_2 \pi^{-1} \arcsin [w / (w^2 + h^2)^{0,5}]$.

3. ОЦЕНКА КОНФОРМНОСТИ

3.1. Значения показателя подвижности (K_n), который определяет конформность слоев, оценивались по данным энергии активации химических реакций процессов осаждения [2, 3, 9]. При этом теплота активации поверхностной диффузии реагентов принималась как половина тепло-

ты физической адсорбции реагентов или подобных веществ, близких по своей структуре и массе [10, 11]. Исходные данные для оценок приведены в табл. 1. Толщина пограничного слоя (δ) рассчитывалась по значению критерия ламинарности Рейнольдса $Re \approx 10^3$ [2] для потока с характерным пробегом в реакторе $L^* = 10$ см. Степень заполнения в условиях непрерывно обновляемой поверхности растущего слоя принят $\theta = 0,1$. Расчетные значения показателя конформности для процессов осаждения различных типов слоев приведены на рис. 3. С учетом того, что теплоты активации поверхностной диффузии реагентов имеют близкие значения, составляющие около $5,5 + / - 0,5$ ккал/моль, расчетные значения могут быть аппроксимированы зависимостью от отношения энергии активации к температуре осаждения, как $K(E/T) = 1,07 \cdot 10^{-4} e^{0,55E/T}$.

3.2. Расчетный профиль в траншее для процессов с $K < 1$, например, для слоев SiO_2 , осаждаемых окислением SiH_4 или TEOS, имеет неравномерный характер (рис. 4). Он определяется преимущественно геометрическим фактором доставки (K_r) (п. 2.2). При этом неравномерность слоя осажденного из SiH_4 примерно на треть больше, чем в случае TEOS. Это обусловлено невысоким коэффициентом перераспределения (K_n) SiH_4 , который составляет 0,18 ед. в сравнении 0,37 ед. для процесса с окислением TEOS. Для процессов осаждения с высокими значениями K_n , таких слоев как Si_3N_4 (DCS + NH_3) и SiO_2 (пиролиз TEOS), показатели конформности составляет $1 \cdot 10^2$ и $8 \cdot 10^3$, что соответствует конформному профилю (рис. 4, выделено красным). Необходимо заметить, что улучшению конформности

Таблица 1. Исходные данные к расчету конформности слоев.

Типы слоев	Реагент	E_a ккал/ моль	Q_d ккал/ моль	T К	d см	$\delta_{эфф}$ см	λ см	λ_1 см	θ Отн. ед	a см	w см	h/w Отн.ед
$SiO_{2н/т}$	$SiH_4 + O_2$	10,0	5,0	700	10^{-4}	0,3	10^{-2}	10^{-6}	0,1	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,3–4,0
	TEOS + O_2	12,0	6,0	700								
$SiO_{2н/т}$	TEOS, пиролиз	25,0	5,0	1000								1,0–2,0
Si_3N_4	DCS + NH_3	18,0	6,0	1000								
Si-поли	SiH_4 , пиролиз	25,0	5,0	950								
W	$WF_6 + H_2$	16,0	5,0	700								

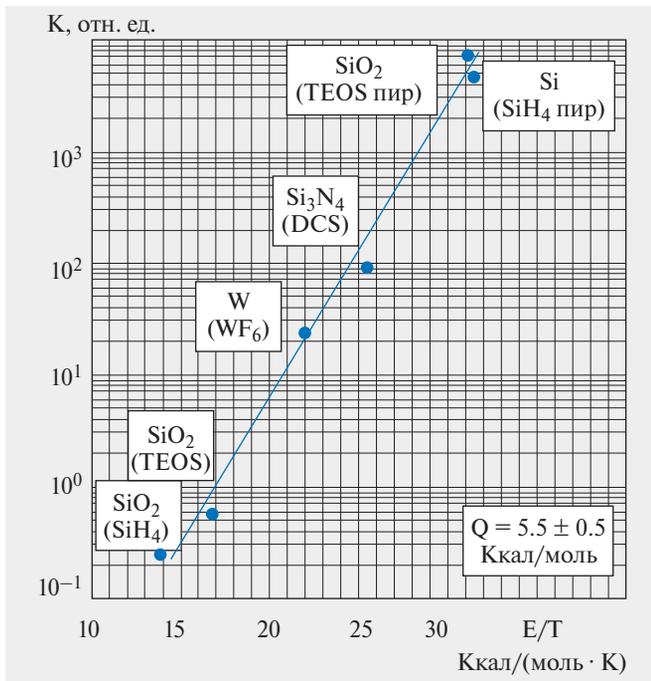


Рис. 3. Расчетные значения показателя конформности (K) и их аппроксимация для различных типов слоев от отношения энергии активации химической реакции (E) к температуре осаждения (T).

в траншее может способствовать и переосаждение молекул реагента при условии невысокого коэффициента прилипания. Однако для рассматриваемых процессов с малым заполнением поверхности,

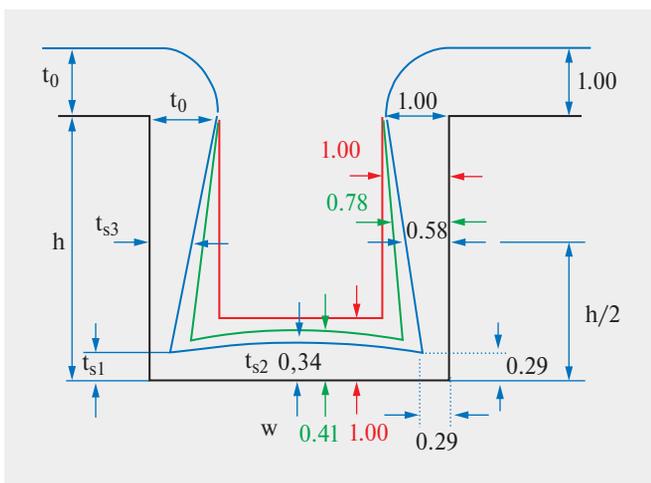


Рис. 4. Профили слоев в траншее $AR = 1$ для процессов с $K_n < 1$: SiO_2 -окисление SiH_4 (обозначено синим), SiO_2 – окисление TEOS (зеленый), и профилей с $K > 1$ (красный): SiO_2 – пиролиз TEOS и Si_3N_4 – аммонолиз DCS.

коэффициент прилипания обычно близок к единице, и здесь не учитывается.

Экспериментальный профиль слоя SiO_2 в траншее с $AR = 0,7$, характерный для процесса осаждения окислением SiH_4 ($K < 1$) показан на рис. 5. Отмечается наплывной характер профиля на углах траншеи, который обусловлен возрастанием экранирования доставки реагента с ростом толщины слоя. В отличие от указанного профиля, на фото рис. 6 представлены конформные профили для слоев SiO_2 (пиролиз TEOS) и Si_3N_4 , имеющих $K > 1$.

3.3. Неравномерность профиля слоев SiO_2 , осажденного окислением SiH_4 (п. 3.2) ухудшается приблизительно на порядок при увеличении аспектного отношения траншеи от 0,3 до 4,0, (рис. 7).

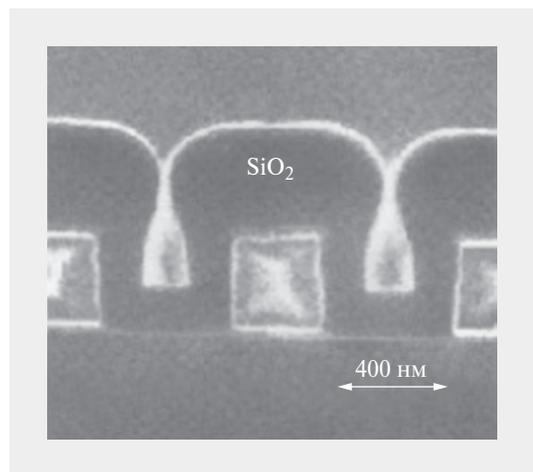


Рис. 5. Неконформный профиль слоя SiO_2 [3] осажденного из $SiH_4 + O_2$, ($K = 0,24$).

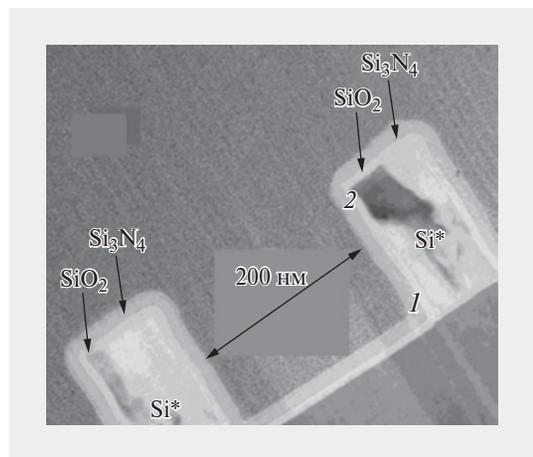


Рис. 6. Конформные профили слоев с $K > 1$: SiO_2 (TEOS пир) и Si_3N_4 .

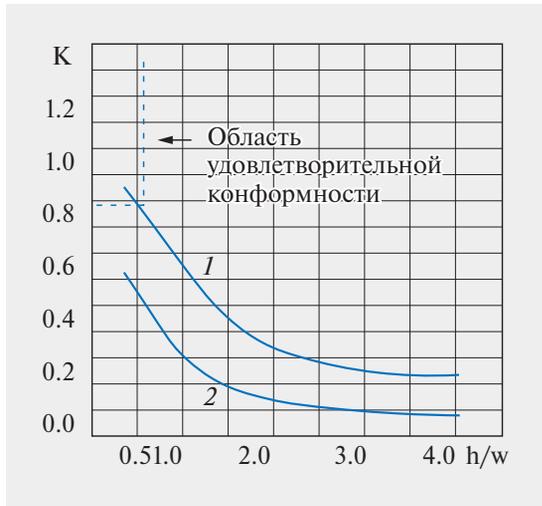


Рис. 7. Зависимость показателя конформности слоев от относительной глубины траншеи: 1 – SiO₂ (TEOS + O₂), 2 – SiO₂ (SiH₄ + O₂).

Профиль, близкий к равномерному, $K = 0,97$ ед, формируется при осаждении из TEOS лишь при $AR \leq 0,3$. В этих условиях для процесса осаждения из SiH₄ $K \leq 0,63$ ед.

3.4. Для актуальной топологии ИС памяти или микропроцессоров, содержащих массивы затворов или гребней, например, «fin-fet» транзисторов с глубоко субмикронными размерами, коэффициент загрузки слоев SiO₂ (SiH₄+O₂), осаждаемых преимущественно в диффузионной области, оценивается значением $\chi = \delta / (L_2 + 2nh) = 0,5$ ед. и $t_2 = 0,5t_1$. Оценка сделана для $L_2 = 0,5$ см, $h = 5 \cdot 10^{-6}$ см (50 нм), $n = 10^4$ траншей и характерном значении $\delta = 0,3$ см. Для слоев SiO₂ (пиролиз TEOS) и Si₃N₄, растущих в переходной диффузионно-кинетической области, коэффициент загрузки $\chi^* = \chi(1 + k) \approx 1,5\chi = 0,75$ при $f_d \approx f_r \approx 10^{17}$ см⁻²с⁻¹ и $k \approx 0,5$ (п. 2.5). Профиль и соответствующие толщины указанных слоев в критических точках представлены на рис. 8.

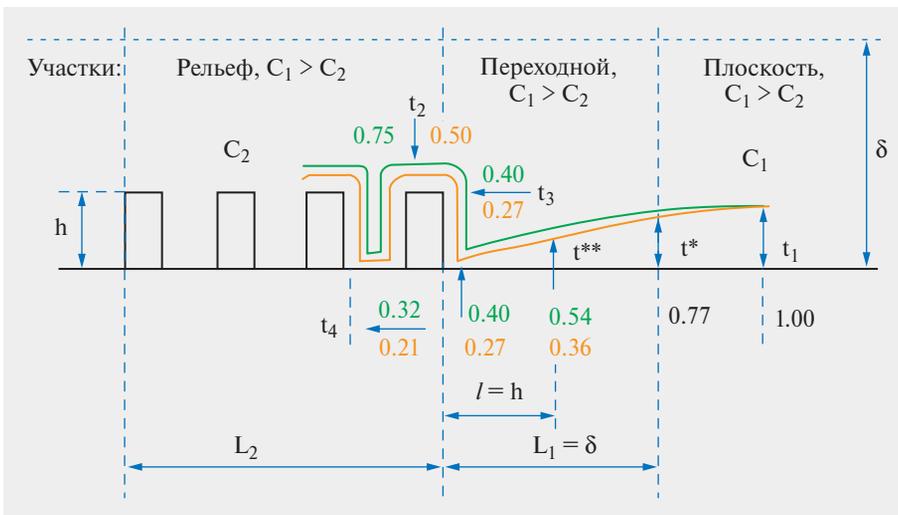


Рис. 8. Расчетные профили на рельефной структуре при $\chi = 0,50$ и $\chi^* = 0,75$.

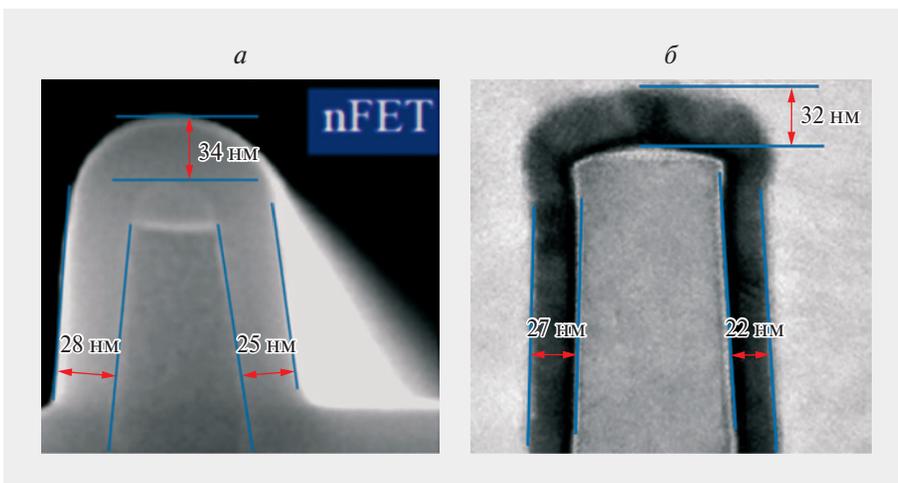


Рис. 9. Профили слоев на регулярных элементах глубоко субмикронных структур: а) Si₃N₄ (DCS + NH₃, б) Si* (пиролиз SiH₄) [3].

Экспериментальные профили слоев Si_3N_4 и Si^* на регулярных субмикронных структурах (рис. 9) показывают характер распределения толщины на вершине и стенках гребней, подобный расчетному. Следует подчеркнуть, что толщина на стенках имеет достаточно высокую равномерность, что говорит об эффективном диффузионном распределении реагентов в процессах с $K > 1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Конформность на микрорельефной подложке для слоев, осаждаемых из газовой фазы с термической активацией при пониженном давлении, определяется геометрическим фактором экранирования молекулярной доставки реагента и скоростью поверхностной диффузии реагента относительно скорости химической реакции.

2. Показатель конформности различных типов слоев, при сопоставимых значениях теплоты активации диффузии реагентов, характеризуется общей зависимостью от отношения энергии активации химической реакции к температуре осаждения.

3. Эффект загрузки, как локальное уменьшение скорости роста слоя, проявляется на структурах с развитым микрорельефом, имеющим значительную удельную величину физической поверхности, и определяется отношением толщины пограничного газового слоя к суммарной глубине траншей по сечению рельефной площадки. Расчетный коэффициент загрузки для тестовой рельефной субмикронной структуры с $AR = 2$ при осаждении слоев с $K > 1$, составляет 0,50–0,75. Для этих условий, толщина в траншеях, оставаясь равномерной, не превышает 0,32 ед. от толщины на плоском участке.

4. Оценка профилей слоев осаждаемых на субмикронные структуры показала удовлетворительное соответствие модели экспериментальным данным. Предложенный подход и аналитические выражения могут использоваться для прогнозирования и оценки конформности слоев осаждаемых из газовой фазы с термической активацией.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Техносфера. Москва, 2011.
2. **Klaus K.** Handbook of Thin-film Deposition Processes and Techniques. N.P., Westwood, NJ, USA. 1988.
3. **Krishna S.** Handbook of Thin-film Deposition Processes and Technologies. N. P., NY, USA, 2002.
4. **Васильев В., Репинский С.** Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы. Успехи химии, 74 (5), 2005, стр. 452–483.
5. **Васильев В.** Применение методов химического осаждения тонких слоёв из газовой фазы для микросхем с технологическими нормами 0,35–0,18 мкм. Часть 5 Схемы роста и корреляция закономерностей осаждения и свойств тонких слоёв. Электронная техника, серия 2, стр. 48–63.
6. **Pejnefors J.** Chemical Vapor Deposition of Si and SiGe Films for High-Speed Bipolar Transistors, ISRN KTH/EKT/FR-2001.
7. **Евдокимов В.** Исследование механизмов формирования профиля слоев оксида кремния, осаждаемых из газовой фазы. Микроэлектроника, вып. 4(176), стр. 70–76.
8. **Евдокимов В.** Молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы Ж. Электронная техника сер. 3, Микроэлектроника, вып. 4, стр. 42–55, (168), 2017.
9. **Vasil'ev V.,** Trends in CVD Technology and Equipment for Obtaining Thin Insulating SiO₂-Based Films in Microelectronics, Part 2: Narrow Gap Fill, Mikroelektronika, 1999, vol. 28, no. 3, pp. 183–192.
10. **Авгуль Н., Киселев А., Пошкус Д.** Адсорбция газов и паров на однородных поверхностях, Москва, «Химия», 1975.
11. **Искринян А., Киселев А.** Адсорбция бензола и гексана на кварце. Доклады АН ССР, 1958, том 119, № 4, стр. 731–734.

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЗОПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С АДСОРБИРОВАННОЙ ВОДОЙ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 233–273 К

► В.В. Бардушкин, Ю.И. Шилыева, А.А. Кочетыгов, А.А. Дронов
МИЭТ

Построена теоретическая модель прогнозирования значений компонент тензора (оператора) концентрации напряжений в мезопористых структурах на основе кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233–273 К. Проведены численные модельные расчеты и исследованы зависимости значений компонент указанного тензора от объемного содержания воды в матрице пористого кремния.

STRESS CONCENTRATION IN MESOPOROUS SILICON-BASED STRUCTURES WITH ADSORBED WATER IN THE TEMPERATURE RANGE 233–273 K

V.V. Bardushkin, Yu.I. Shilyaeva, A.A. Kochetygov, A.A. Dronov
MIET

A theoretical model is presented for predicting the values of tensor (operator) components of the stress concentration in mesoporous silicon-based structures with adsorbed water in the temperature range 233–273 K. Numerical calculations were carried out using the developed model. The dependences of values of the tensor components on the volumetric water content in the mesoporous silicon matrix were investigated.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач в области исследования и разработки новых электродных материалов и совместимых с ними электролитов является подбор компонентов электрохимических устройств, позволяющий устранить основную проблему существующих металл-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов – их пожароопасность. В этой связи особый интерес вызывают исследования электролитов на водной основе и используемых в качестве электродного материала мезопористых структур (пористый кремний, анодные оксиды титана, ванадия и др.), синтез которых основан на принципе самоорганизации [1–4].

Высокая удельная поверхность мезопористых электродных материалов приводит к необходимости учета возможных изменений свойств контак-

тирующих с ними электролитов на водной основе. В частности, изменение температуры плавления/замерзания электролитов в пористых материалах может оказать влияние на их низкотемпературное поведение в металл-ионных аккумуляторах и суперконденсаторах [5–7].

Известно, что наряду с высокой удельной поверхностью определенный вклад в понижение температуры плавления частиц, заключенных в матрицу другого материала, вносит такая физико-механическая характеристика, как объемная плотность энергии деформации (ОПЭД) [8–11]. ОПЭД, в свою очередь, зависит от значений локальной упругой характеристики – оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга). Поэтому возникает необходимость в установлении характера влияния возникающих при плавлении/замерзании жидких

электролитов механических напряжений на стабильность мезопористых структур в условиях низких температур. Для обеспечения возможности определения вклада ОПЭД в понижение температуры фазового перехода лед – вода в мезопористой матрице в работе предложена теоретическая модель расчета значений компонент тензора концентрации напряжений в структурах на основе пористого кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233–273 К.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

В основе решения задачи прогнозирования локальных (внутренних) упругих характеристик мезопористых структур, насыщенных жидкостью (в различных фазовых состояниях), лежат численные расчеты и анализ значений компонент $K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r})$ тензора (оператора) концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ (здесь и далее по тексту \mathbf{r} – радиус-вектор случайной точки неоднородной среды) [12,13]. Тензор четвертого ранга $K^\sigma(\mathbf{r})$ связывает локальные $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ и средние $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ значения напряжений в неоднородном материале:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

Угловые скобки здесь и далее определяют процедуру статистического усреднения (по объему или по ориентациям кристаллографических осей кристаллитов) [12,14]. При этом для многокомпонентных композитов операция усреднения по объему для некоторой случайной величины $b(\mathbf{r})$ сводится к суммированию

$$\langle b(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s v_s \langle b_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

где v_s – объемная концентрация компонента s -го типа, а $b_s(\mathbf{r})$ – соответствующая указанному компоненту случайная величина; $\sum_s v_s = 1$ [12,14].

Для приближений, учитывающих взаимодействие включений, оператор $K^\sigma(\mathbf{r})$ можно получить, решая уравнение равновесия (систему дифференциальных уравнений второго порядка со случайными кусочно-однородными коэффициентами). Используя метод функций Грина, с помощью обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей и специально вводимого однородного тела сравнения, выражение для $K^\sigma(\mathbf{r})$ имеет вид (индексы опущены) [12,13]:

$$K^\sigma(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \times \langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (2)$$

где $c(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; двойным штрихом определяется разность между величинами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются верхним индексом «с»: $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$; I – единичный тензор; $g(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия. Компоненты g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ вычисляются следующим образом:

$$g_{ijkl} = a_{i(jkl)j}. \quad (3)$$

Здесь $a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega$, где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла в сферической системе координат; t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$; n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями $n_1 = l_1^{-1} \sin \theta \cos \varphi$, $n_2 = l_2^{-1} \sin \theta \sin \varphi$, $n_3 = l_3^{-1} \cos \theta$. По парам индексов i и j, k и l , заключенным в выражении (3) для компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ в круглые скобки, осуществляется операция симметризации [14].

Далее в работе рассматривались мезопористые материалы (пористый кремний), представляющие собой мембраны толщиной порядка 80 мкм со сквозными порами, форма которых близка к цилиндрической, однако при этом они могут изгибаться и ветвиться. Пористость материалов (объем пор, отнесенный к объему образца) составляла порядка 45%, диаметр пор – 18 ± 5 нм, расстояние между порами – 46 ± 5 нм (по данным сорбционного анализа и растровой электронной микроскопии). Структуры образцов напоминали губку, при этом сквозные поры были насыщены деионизированной водой. Исследования проводились в интервале температур 233–273 К.

Поскольку понижение температуры образцов до 233 К приводило к замерзанию несвязанной воды в порах кремния, далее в работе рассматривались двухкомпонентные композиты вида «пористый кремний–лед» (в окрестности температуры плавления льда, которая, согласно экспериментальным данным дифференциальной сканирующей калориметрии, составляла величину порядка 255 К) [15]. К компоненту первого типа относились включения в форме ориентированных волокон льда. В качестве матрицы – компонент второго типа – рассматривался кремний.

Монокристаллический кремний, используемый для формирования мембран, является анизотропным материалом с кубической кристаллической структурой. В работе брались следующие значения для ненулевых элементов симметрической матрицы c тензора модулей упругости его монокристаллов (ГПа) [14]: $c_{11} = c_{22} = 165,7$, $c_{12} = c_{13} = c_{23} = 63,9$, $c_{44} = c_{55} = c_{66} = 79,6$. Для проведения модельных расчетов локальных упругих свойств композитов вида «пористый кремний-лед» использовались эффективные характеристики поликристаллического кремния, полученные методом самосогласования [14]. Эти характеристики были определены с помощью усреднения по всевозможным ориентациям кристаллографических осей кристаллитов кремния (с изотропной функцией распределения), сводящегося к интегрированию по всевозможным углам Эйлера [12,14]. С этой целью в работе была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров c^c тела сравнения брались значения тензора модулей упругости поликристаллического кремния (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения выбирались упругие характеристики поликристаллического кремния, полученные в приближении Хилла [12,14]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01 ГПа. При этом считалось, что матрица c^c , полученная на последнем шаге итерационной процедуры, является матрицей эффективных модулей упругости поликристаллического кремния, используемой в дальнейших расчетах.

Такой же подход был применен и для нахождения значений элементов матрицы эффективных модулей упругости поликристаллического льда, используемой в дальнейшем при проведении модельных расчетов локальных упругих свойств композитов вида «пористый кремний-лед». При этом для льда гексагональной кристаллической структуры в работе брались следующие значения для ненулевых элементов симметрической матрицы c тензора модулей упругости его монокристаллов (ГПа): $c_{11} = c_{22} = 14,7$, $c_{33} = 15,8$, $c_{12} = 7,4$, $c_{13} = c_{23} = 6,0$, $c_{44} = c_{55} = 3,2$, $c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12}) = 3,65$ [16]. Отметим, что вычисленные таким образом значения элементов матрицы эффективных модулей упругости поликристаллического льда хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [17].

При построении модели прогнозирования локальных упругих свойств рассматриваемых в ра-

боте композитов считалось, что сквозные поры представляют собой равные друг другу сильно вытянутые эллипсоиды вращения (l_1 , l_2 и l_3 – полуоси этих эллипсоидов). Полагалось, что эллипсоиды ориентированы своей большей полуосью в пространстве композита в пяти различных направлениях относительно лабораторной прямоугольной системы координат, а именно, параллельно вертикальной оси z (одно направление) и параллельно прямым, образующим равные углы со всеми координатными осями (четыре направления).

При проведении численных расчетов значений компонент оператора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ полагалось, что композиты имеют объемные содержания компонентов v_1 и v_2 ($v_1 + v_2 = 1$), где индекс «1» относится к включениям льда, а «2» – к матрице кремния. Кроме того, считалось, что в каждом из этих пяти направлений эллипсоидальные включения имеют одинаковые объемные концентрации $v_1/5$.

Для рассматриваемых композитов вида «пористый кремний-лед» соотношение (2) для оператора концентрации напряжений в компоненте s -го типа, с учетом (1), имеет следующий вид [12, 13]:

$$K_s^\sigma = c_s \left(I - g_s(c_s - c^c) \right)^{-1} \times \left(\sum_i v_i c_i \left(I - g_i(c_i - c^c) \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (4)$$

В формуле (4) c_s и c^c – тензоры модулей упругости s -го компонента композита и однородного тела сравнения соответственно; g_s – это тензор $g(\mathbf{r})$ s -го компонента композита, вычисляемый по соотношению (3). При этом g_2 соответствует матрице кремния ($l_1 = l_2 = l_3 = 1$), g_1 – ориентированным эллипсоидальным включениям льда. Отметим, что у тензора g_1 имеется пять различных ориентаций, согласованных с ориентациями эллипсоидов (в модельных расчетах величина большей полуоси эллипсоидов принималась равной 4000, а величины остальных полуосей полагались равными 1).

При вычислении упругих характеристик c^c однородного тела сравнения композита вида «пористый кремний-лед» использовался метод самосогласования [14]. Для этого в работе была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров c^c брались значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения выбирались упругие характеристики,

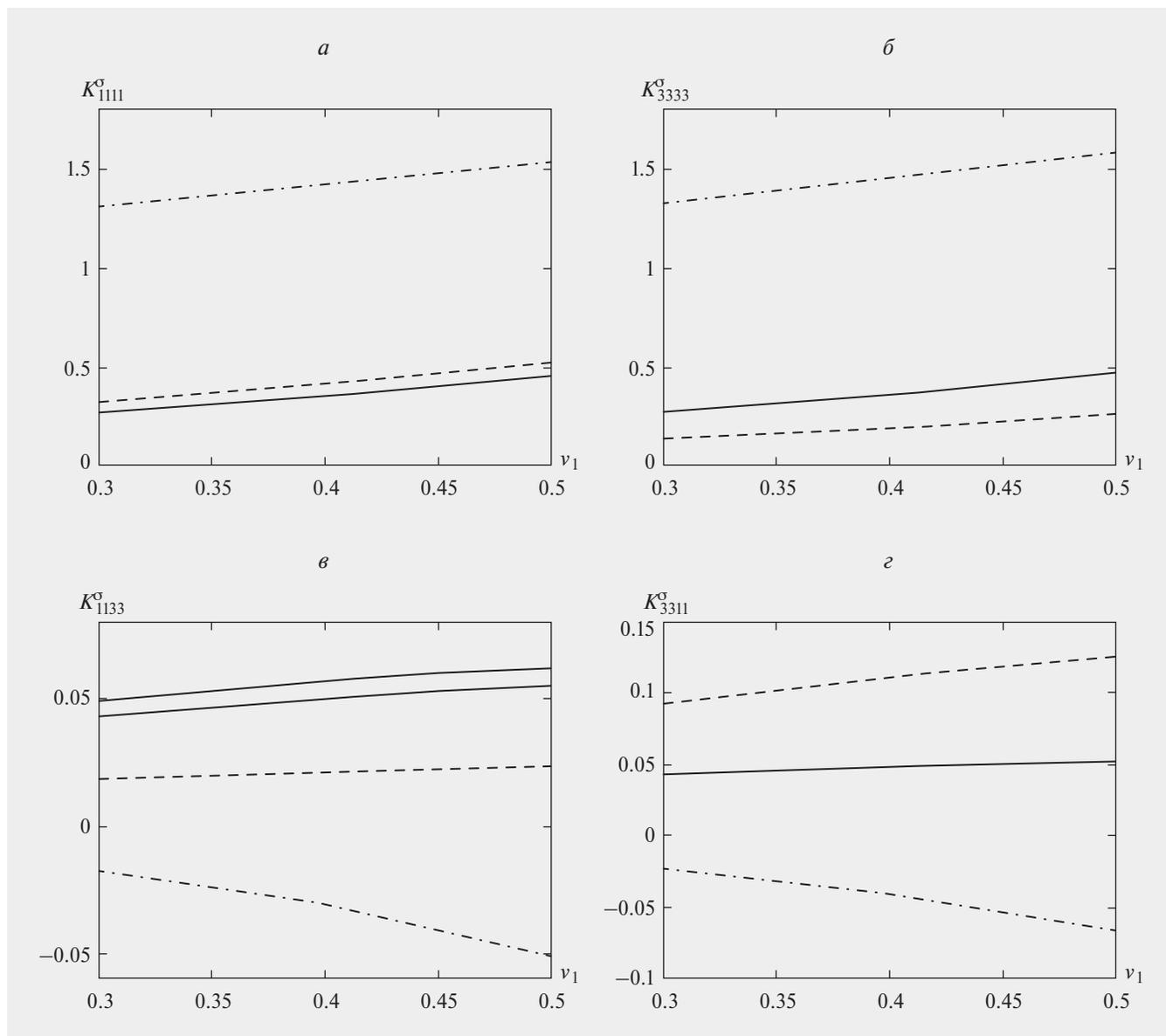


Рис. 1. Зависимости значений компонент оператора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ от объемного содержания льда ν_1 в матрице пористого кремния.

полученные в приближении Хилла [12,14]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01 ГПа.

Основным фактором возникновения механических напряжений во включениях льда и матрице кремния при повышении температуры является термодинамический, обусловленный различием их термических коэффициентов линейного расширения. Поэтому в работе при проведении численных расчетов особое внимание, как и в статье [18], было уделено анализу только компонент

1111, 3333, 1133 и 3311 тензора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$. Это связано с тем, что при термодинамических воздействиях в рассматриваемых материалах именно данные компоненты «отвечают» за связь между локальными (в направлении, задаваемом двумя первыми индексами оператора концентрации) и средними (в направлении, задаваемом двумя его последними индексами) напряжениями. Результаты численных расчетов значений указанных компонент тензора $K^\sigma(\mathbf{r})$ в ориентированных включениях льда и матрице кремния, учитывающие изменения объемного содержания

льда v_1 в мезопористых структурах, приведены на рис. 1. При этом кривые, изображенные на рис. 1 сплошными линиями, соответствуют значениям K_{ijkl}^σ во включениях льда, ориентированных параллельно прямому, образующим равные углы с координатными осями; пунктирными линиями – значениям K_{ijkl}^σ во включениях льда, ориентированных параллельно вертикальной оси z . Кривые, изображенные на рис. 1 штрихпунктирными линиями, соответствуют значениям K_{ijkl}^σ в матрице пористого кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты работы:

- построена теоретическая модель, с помощью которой в дальнейшем возможны вычисление ОПЭД и оценка ее вклада в понижение температуры плавления ориентированных включений льда, заключенных в мезопористую матрицу;

- проведены численные расчеты значений компонент оператора концентрации напряжений (во включениях и в матрице), опирающиеся на построенную модель и учитывающие изменения объемного содержания льда в рассматриваемых мезопористых структурах.

Численные расчеты значений компонент 1111, 3333, 1133 и 3311 оператора концентрации напряжений позволяют заключить следующее:

- значения K_{ijkl}^σ во включениях льда, ориентированных параллельно прямому, образующим равные углы с координатными осями, одинаковы (см. рис. 1 а, б, г) или отличаются незначительно (см. рис. 1 в) независимо от их ориентации в пространстве материала;

- увеличение объемного содержания ориентированных включений льда не приводит к существенному изменению значений компонент тензора $K^\sigma(\mathbf{r})$;

- значения компонент 1133 и 3311 тензора $K^\sigma(\mathbf{r})$ (см. рис. 1 в, г) близки к нулю для элементов неоднородности всех типов.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-33-70180 «Стабильность»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fang G., Zhou J., Pan A., Liang S.** Recent Advances in Aqueous Zinc-Ion Batteries // *ACS Energy Letters*. 2018. Vol. 3. No. 10. P. 2480–2501. DOI: 10.1021/acscenergylett.8b01426.
2. **Zhang N., Jia M., Dong Y., Wang Y., Xu J., Liu Y., Jiao L., Cheng F.** Hydrated Layered Vanadium Oxide as a Highly Reversible Cathode for Rechargeable Aqueous Zinc Batteries // *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. Iss. 10. P. 1807331. DOI: 10.1002/adfm.201807331.
3. **Liu S., Hu J.J., Yan N.F., Pan G.L., Li G.R., Gao X.P.** Aluminum storage behavior of anatase TiO₂nanotube arrays in aqueous solution for aluminum ion batteries // *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. Iss. 12. P. 9743–9746. DOI: 10.1039/C2EE22987K.
4. **Ashuri M., He Q., Shaw L.L.** Silicon as a potential anode material for Li-ion batteries: where size, geometry and structure matter // *Nanoscale*. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 74–103. DOI: 10.1039/C5NR05116A.
5. **Цивадзе А.Ю., Кулова Т.Л., Скундин А.М.** Фундаментальные проблемы литий-ионных аккумуляторов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2013. Т. 49. № 2. С. 149–154. DOI: 10.7868/S0044185613020083.
6. **Кулова Т.Л., Скундин А.М.** Проблемы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов // *Электрохимическая энергетика*. 2017. Т. 17. № 2. С. 61–88. DOI: 10.18500/1608-4039-2017-17-2-61-88.
7. **Тутов Е.А.** Гетерофазные процессы при взаимодействии пористого кремния с водой // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. Т. 9. Вып. 1. С. 131–136.
8. **Шиляева Ю.И., Бардушкин В.В., Гаврилов С.А., Силибин М.В., Яковлев В.Б., Пятилова О.В.** Объемная плотность энергии деформации в пористозаполненном металлических нитевидными нанокристаллами анодном оксиде алюминия // *Журнал физической химии*. 2013. Т. 87. № 11. С. 1889–1893. DOI: 10.7868/S0044453713100233 (Перевод изд.: **Shilyaeva Yu.I., Bardushkin V.V., Gavrilo S.A., Silibin M.V., Yakovlev V.B., Pyatlova O.V.** Bulk density of the energy of deformation in an anodic aluminum oxide with pores filled by threadlike metal nanocrystals // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013. Vol. 87. No. 11. P. 1870–1874. DOI: 10.1134/S0036024413100178).
9. **Shilyaeva Yu.I., Bardushkin V.V., Gavrilo S.A., Silibin M.V., Yakovlev V.B., Borgardt N.I., Volkov R.L., Smirnov D.I., Zheludkevich M.L.**

- Melting temperature of metal polycrystalline nanowires electrochemically deposited into the pores of anodic aluminum oxide // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014. 16(36). P. 19394–19401. DOI: 10.1039/c4cp02436b.
10. **Шиляева Ю.И.** Исследование особенностей фазовых переходов I рода в нитевидных нанокристаллах (In, Sn, Zn) в порах анодного Al_2O_3 // дис.к.х.н: 02.00.04/ – М., 2015. 141 с.
 11. **Бардушкин В.В., Кириллов Д.А., Шиляева Ю.И., Гаврилов С.А., Яковлев В.Б., Силибин М.В.** Влияние термоупругих свойств компонентов на температуру плавления нитевидных наночастиц Cu, Ag и Au в матрице анодного Al_2O_3 // *Журнал физической химии*. 2017. Т. 91. № 6. С. 1030–1036. DOI: 10.7868/S0044453717060048 (Перевод изд.: **Bardushkin V.V., Kirillov D.A., Shilyaeva Yu.I., Gavrilov S.A., Yakovlev V.B., Silibin M.V.** Effect of the Thermoelastic Properties of Components on the Melting Point of Filamentary Nanoparticles of Cu, Ag, and Au in the Matrix of Anodic Al_2O_3 // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017. Vol. 91. No. 6. P. 1099–1104. DOI: 10.1134/S0036024417060036).
 12. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Колесников И.В.** Механика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение). – Ростов-на-Дону: изд-во РГУПС, 2012. 288 с.
 13. **Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П.** О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17.
 14. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. 399 с.
 15. **Shilyaeva Y., Volovlikova O., Poyarkov K., Yuditskaya S., Gavrilov S.** Characterization of Mesoporous Silicon Using DSC Thermoporometry // *International Journal of Nanoscience*. 2019. Vol. 18. No. 3&4. P. 1940073. DOI: 10.1142/S0219581X19990011.
 16. **Белослудов В.Р., Инербаев Т.М., Шпаков В.П., Це Д.С., Белослудов Р.В., Кавазое Е.** Модули упругости и границы стабильности льдов и клатратных гидратов кубической структуры I // *Рос. хим.ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*. 2001. Т. XLV. № 3. С. 45–50.
 17. **Schulson E.M.** The Structure and Mechanical Behavior of Ice // *JOM*. 1999. Vol. 51. P. 21–27. DOI: 10.1007/s11837-999-0206-4.
 18. **Красников Г.Я., Бардушкин В.В., Силибин М.В., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Концентрация напряжений и деформаций в анодном оксиде алюминия с нитевидными порами, заполненными поливинилиденфторидом // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2016. № 2. С. 65–70.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМ

► **В.В. Благодатов**
АО «НИИМЭ»

В рамках работы продемонстрирована комбинация кластеризации и PCA для подготовки измерений к Correlation Power Analysis или Differential Power Analysis [1].

SCA IMPROVED BY CLUSTERING AND PCA

V.V. Blagodatov

«MERI», SC

In this paper we detail techniques of clustering and PCA that can be used for improving Side Channel Attacks [1].

ВВЕДЕНИЕ

В задаче анализа микросхем методом побочных каналов необходимо извлечь полезную информацию с наибольшей точностью и минимальным объёмом выборки. В данной работе с помощью комбинации кластеризации и Principal Component Analysis [2] получено увеличение коэффициента корреляции (CPA) на 20% при одновременном сокращении объёма выборки.

ПОБОЧНЫЕ КАНАЛЫ

Как известно, неинвазивные методы анализа микросхем являются очень доступными и эффективными. Техника анализа в общем случае выглядит следующим образом. Выполняют запуск устройства в том режиме, который необходимо исследовать, и производят измерение ближнего электромагнитного поля индуцированного микросхемой. Измерения повторяют необходимое количество раз и результаты измерений сохраняют для дальнейшей обработки. После записи измерений производят идентификацию интересующей нас области и производят грубое выравнивание с отбрашиванием неинформативных участков для минимизации объёма хранимой и обрабатываемой информации. Для алгоритмов инвариантных к сдвигу может быть достаточно выравнивания с низкой точностью. К таким алгоритмам можно отнести комбинированные алгоритмы, использующие свёртки с локальными фильтрами для выделения признаков.

Целью анализа может быть исследование технологических параметров микросхемы, тестирование

электромагнитной совместимости отдельных блоков, расположенных на одном кристалле, исследование информационных утечек микросхемы. Наибольшее влияние на развитие анализа побочных каналов оказала область информационной безопасности микросхем. Так, с помощью анализа побочных каналов могут быть раскрыты криптографические ключи, с которыми оперирует микросхема во время работы. Как правило, результаты измерения побочного канала зашумлены, и необходимо подготовить данные для применения алгоритмов классификации.

В качестве модели утечки будем использовать модель Hamming Distance, которая сильно выражена в CMOS устройствах [3] и заключается в том, что токи потребления при переключении ячейки хранения (регистра процессора) из нуля в единицу и обратно близки по значению, а в отсутствии переключения динамического потребления тока – нет.

МОТИВАЦИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ

При применении метода главных компонент существует множество факторов, которые существенно влияют на конечный результат классификации. Типичный маршрут по извлечению полезной информации, связанной с работой микросхемы с применением PCA, состоит из нескольких этапов. Сначала выполняют синхронизацию измерений. Преобразуют данные к новому базису. При этом в качестве наблюдения рассматривается трасса, а её точки – это координаты в многомерном пространстве. Далее выполняют

поиск компонент, которые содержат информационный сигнал. Затем выполняют восстановление данных в исходное пространство с удалением неинформативных компонент. В отличие от большинства других областей применения, в которых наиболее информативными принимаются компоненты с наибольшими собственными значениями, побочные каналы при преобразовании в новое пространство в старших компонентах содержат шум.

Идея улучшения результата обработки трасс заключается в применении предварительной кластеризации и отсеивании измерений, далеко отстоящих от центров кластеров. И только потом выполняется PCA и корреляционный анализ. При этом очень важно чтобы кластеризация и PCA проводились на различных участках трассы. В качестве критерия оценки эффективности предобработки трасс был использован корреляционный анализ. Он заключается в вычислении коэффициента корреляции между значением маркировки трассы и значением сигнала в момент времени t . Маркировка трасс проводится для модели Hamming Distance.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ

Набор измерений содержит шум, который неравномерно распределен среди множества временных рядов. Кроме того, шум имеет некоторое конечное множество распределений. Причинами такого шума служит работа отдельных блоков микросхемы и механизмов защиты от инженерных атак, реализованных в микросхеме. Для борьбы с подобным шумом можно применить кластеризацию для локализации схожих паттернов со схожими состояниями в отдельных кластерах.

В нашем эксперименте мы предварительно провели выравнивание на «блок 1» левее от места, где будем оценивать утечку (рис. 1). Это сделано для предотвращения увеличения систематического шума, вносимого алгоритмом выравнивания. Таким образом, осталась небольшая рассинхронизация в области интереса «блок 2».

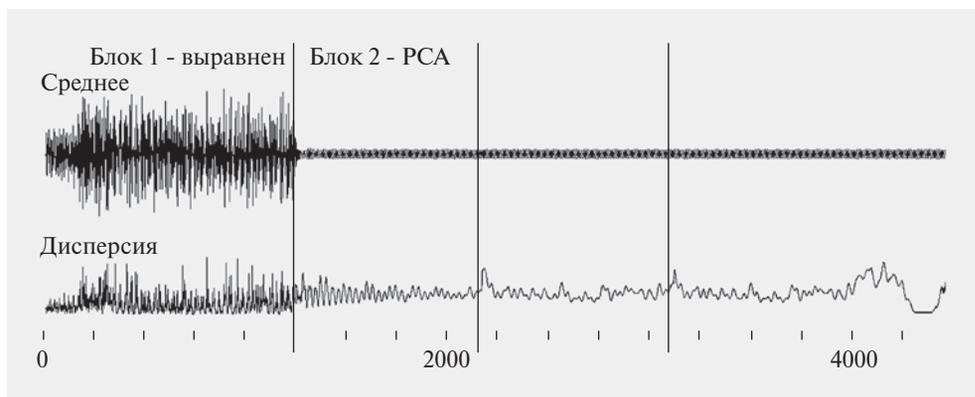


Рис. 1. Среднее и дисперсия измерений.

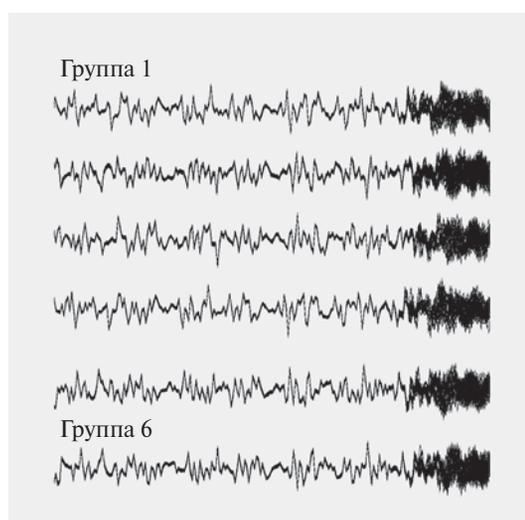


Рис. 2. Шесть выделенных кластеров.

Далее мы выделили шесть кластеров. Для каждого наблюдения (измерения) вычислили расстояние от него и до каждого центра кластера. Для дальнейшего анализа оставили только те экземпляры, у которых расстояние до любого из кластеров меньше заданного порога. При этом кластеризацию проводили по участку измерения «блок 1», который левее области, где будем проводить PCA и CPA. На рис. 2. представлены шесть кластеров с наложением по 80 измерений в каждом. В конце синхронизированного участка можно видеть расхождения графиков, и в этой области находится место переключения интересующего нас регистра. Именно по этой области («блок 2») будем далее проводить PCA и окончательную оценку корреляции.

Итого в результирующий набор попало около 5-6% от каждого кластера или в сумме 30% от первоначального объема выборки.

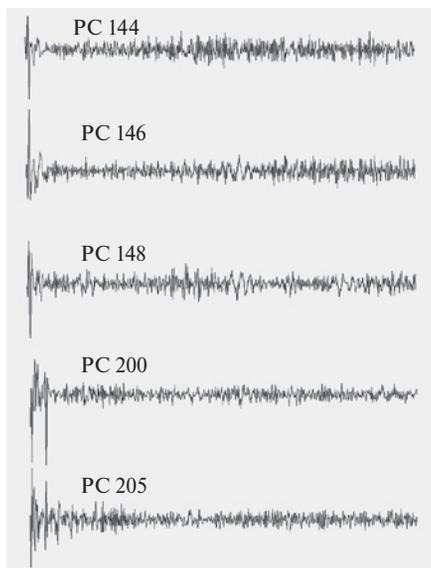


Рис. 3. Некоторые из отображенных компонент PCA преобразования «блок 2».

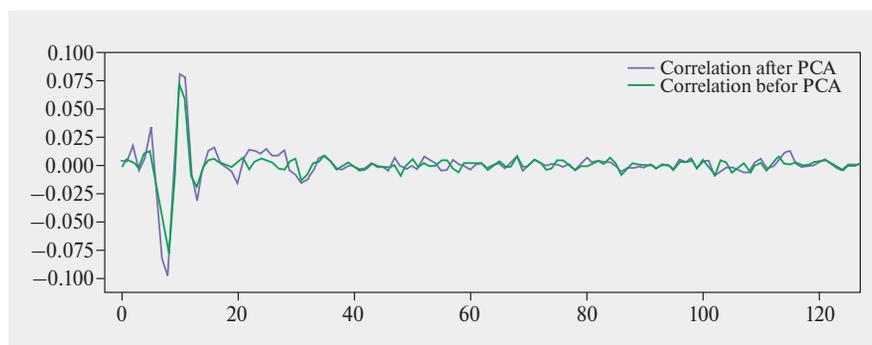


Рис. 4. Коэффициент корреляции до и после PCA для «блок 2».

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Для анализа в качестве наблюдений будут трассы, а точки – координатами в многомерном пространстве. При этом размерность пространства будет определяться числом точек трассы. Мы берём целиком участок, отвечающий за шифрование одного блока данных, при этом область выравнивания и кластеризации находится слева от участка шифрования. Таким образом, в явном виде область шифрования не участвовала в обработке. После вычисления главных компонент отобрали часть из них для обратного преобразования с 121 по 864 компоненты, некоторые из них приведены на рис. 3. Далее производим восстановление данных в исходное признаковое пространство с участием только выбранных главных компонент.

Приведём результаты вычисления коэффициентов корреляции для PCA обработки без кластеризации и для PCA с предварительной кластеризацией. На рис. 4 отсчёты 8 и 10 соответствуют минимуму и максимуму коэффициента корреляции на верной гипотезе. После PCA коэффициент корреляции увеличился на 20%.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты применения комбинации кластеризации и PCA. При этом кластеризация выполнена на участке, предшествующем блоку с информационной утечкой и PCA

преобразованием с отбрасыванием неинформативных компонент при восстановлении. Получили 20% увеличения коэффициента корреляции CPA на PCA recovered трассах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kocher P.; Jaffe J.; Jun B.** Differential power analysis // CRYPTO'99.
2. **Pearson K.** On lines and planes of closest fit to systems of points in space // Philosophical Magazine Series 6, 2(11): 559-572, 1901.
3. **Veendrick H. J.M.** Short-circuit dissipation of static CMOS circuitry and its impact on the design of buffer circuits // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1984.
4. **Красников Г.Я., Шелепин Н.А.** Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Международная научно-техническая конференция с элементами научной школы для молодёжи. – М.: Зеленоград, 2010.
5. **Шелепин Н.А.** Смарткарты на основе отечественных микросхем. Разработка, производство, применение // Наноиндустрия. – 2017. – № Спецвыпуск (74). – С. 12-13.

ПРОБЛЕМА ВЫПУСКА КАЧЕСТВЕННЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

► Н.С. Данилин¹, Д.М. Димитров², И.Ю. Булаев¹

¹ АО «Российские космические системы»,

² ООО «Космос Комплект»

В статье рассмотрена проблема производства отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре и возможные пути ее решения на основе технологии «система в корпусе».

THE HIGH-QUALITY MICROCIRCUITS FOR RUSSIAN MICROELECTRONICS PRODUCTION PROBLEM

N.S. Danilin¹, D.M. Dimitrov², I.Yu. Bulaev¹

¹ JSC "RSS",

² LLC "Cosmos Complect" Ltd

The article discusses the Russian microcircuits for space equipment production problem and possible solutions based on technology «system in package».

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы качества и долговечности изделий космической микроэлектроники постоянно были и есть в эпицентре внимания и деятельности как Министерства Общего Машиностроения СССР, так и его фактического наследника в настоящее время – Роскосмоса. Например, еще в 1979 г. был создан Институт надежности космического приборостроения (ИНКП). К сожалению, его полноценное функционирование было отодвинуто на неопределенное время в связи с глобальными переменами в нашей стране (Афганская война, развал СССР). Тем не менее, указанные проблемы активно решались в соответствии с запросами технологического развития космического приборостроения.

Вопросы применения электронной компонентной базы (ЭКБ) в аппаратуре космических систем, а также проблемы развития отечественной микроэлектроники спецназначения в условиях активного импортозамещения были рассмотрены на прошедшей в сентябре 2019 года XVIII международной научно-технической конференции «Электронная компонентная база космических систем». Об актуальности поднятых на конференции тем можно судить по ряду представленных докладов:

– Эннс В.И. (АО «НИИМЭ»): «Новые изделия АО «НИИМЭ» для аппаратуры космического назначения»;

– Новоселов А.Ю. (АО «ППК Миландр»): «Специальные микросхемы – взгляд в будущее. Перспективные технологии и проекты по созданию ИМС для аппаратуры космического применения»;

– Данилин Н.С., Димитров Д.М. (АО «РКС», ООО «Космос Комплект»): «Микросистемы для бортового искусственного интеллекта»;

– Романов О.П., Савенков В.В. (ЗАО «Орбита»): «Обеспечение высоких технических требований к аппаратуре перспективных космических аппаратов на отечественной ЭКБ – проблемы и пути решения»;

– Чалый В.П. (АО «Светлана-Рост»): «Отечественная нитридная ЭКБ – проблемы и перспективы»;

– Филаретов А.Г. (АО «Светлана-Рост»): «Специализированная твердотельная СВЧ ЭКБ – проблемы и перспективы»;

– Азанова И.С. (ПАО «ПНППК»): «Опыт разработки радиационно-стойкого термостойкого оптического волокна»;

– Дормидошина Д.А. (АО «ЦКБ «Дейтон»): «Модели ЭКБ для РЭА космического назначения»;

– Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Сабиров И.Х. (АО «РКС», ООО «Космос Комплект»): «Практическая методология разработки систем в корпусе»;

– Тележинский И.В., Кузьмичев А.М., Шилиев А.Ю., Несмашный Е.А. (АО «РКЦ «Прогресс»,

НПП «ОПТЭКС»): «Герметичные волоконно-оптические соединители для бортовых систем передачи информации».

Как пример признания достижений российских ученых можно отметить и вышедшие в ПО «Интеграл» (республика Беларусь) монографии «Космическая электроника» (как на русском, так и на английском языке), а также аналитический обзор «Основные тенденции развития, проблемы и угрозы современной микроэлектроники», в которых специалистам Роскосмоса отведено самое достойное место. Более того, руководители ПО «Интеграл» утверждают несомненный приоритет российской научной школы в разработке эффективных методов обеспечения качества и надежности ЭКБ космического назначения.

Важность указанной проблемы резко возрастает в связи с развитием индустрии уже практически серийного производства малых космических аппаратов на основе использования стандартных модулей [1]. Здесь существенным является решение вопросов гарантирования надежности и долговечности малых спутников путем их проектирования с обязательным термоанализом изделий ввиду высокой плотности компоновки систем.

Следует отметить, что в Национальном управлении по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA, США) подобный подход сыграл решающую роль при разработке зондов «Вояджер», которые исправно работают уже в течение 30 лет, до сих пор передают сигналы на Землю и вот-вот выйдут за пределы Солнечной системы.

«Белые пятна» отечественной ЭКБ и предложения по их устранению

В число наиболее важных проблем обеспечения надежности разрабатываемых космических аппаратов, входит, в первую очередь, наличие необходимой ЭКБ.

Прежде всего определим, что такое «белые пятна» в отечественной ЭКБ космического и специального применения. Это те микросхемы и электронные модули, которые необходимы разработчикам аппаратуры, но которые отсутствуют в отечественных перечнях (или они есть, но недоступны для применения по ряду причин в конкретном проекте), и в то же время их нельзя импортировать. Естественно, выбор какого-то типонаминала ЭКБ определяется требованиями к его техническим и надежностным параметрам, срокам поставки и периоду применения.

Согласно данным открытых источников, разработчики ведущих мировых производителей космической и специальной аппаратуры пользуются весьма широким набором типонаминалов ЭКБ – около 5000 [2].

С целью сокращения и исключения изделий со схожими параметрами зарубежных производителей в российских разработках еще до введения известных санкций на поставку ЭКБ из-за рубежа в Роскосмосе была проведена работа по оптимизации перечня ЭКБ иностранного происхождения (ИП) для космического применения. Это привело к созданию перечня ЭКБ ИП из 1680 наименований, который был утвержден действующим тогда главой Роскосмоса Остапенко О.Н. Этот перечень после последующих сокращений был доведен до примерно 900 позиций и был утвержден межведомственным Советом главных конструкторов (СГК) по ЭКБ под руководством генерального директора АО «НИИМЭ» акад. Красникова Г.Я. Последняя версия перечня и стала ориентиром в программе импортозамещения под эгидой Минпромторга РФ. Работа по импортозамещению была регламентирована введением системы выполнения ОКР по маршруту «заказчик ЭКБ – ГНИУ РКС – МНИИРИП – Минпромторг».

Оценку результатов перечисленных мероприятий к 2019 г. можно свести в самом общем виде к следующему – запущено более 170 ОКР по перечню из 900 ЭКБ. Однако завершено всего около десятка работ, а в потребительской доступности – и того меньше. Разработанный специалистами «Микрона» «минимально необходимый и достаточный» набор микросхем для разработки космической аппаратуры пока не позволяет создавать инновационные по мировым понятиям изделия в этой области.

Причин для такого состояния дел несколько:

- высокая стоимость ОКР;
- длительные сроки проведения ОКР и процесс внедрения в производстве;
- высокая себестоимость изделий ввиду малой востребованной серийности и нерегулярных закупок.

Таким образом, очевидно, что ввиду низкого спроса отечественным производителям не выгодно производить ЭКБ для космоса и спецпроектов. Значительно выгоднее для них заниматься ОКР и использовать услуги иностранных производителей на этапе создания опытных образцов. И даже с этой позиции надо отметить, что возможное число ОКР, которые они могут взять на себя в год, весьма ограничено по сравнению с потенциальным объемом ОКР, которые ожидают свою очередь.

Технология «система в корпусе» и ее эффективность

В семейство приборов «система в корпусе» (СвК) входит широкий набор ЭКБ – от однокристалльной микросхемы до многокристалльных модулей с интеграцией дискретных, фотонных и пассивных компонентов, МЭМС и др. Обычно СвК собрана в одном стандартном или специализированном корпусе и представляет собой законченное изделие [3].

Для практической реализации этой технологии необходимо в первую очередь организовать банк полупроводниковых кристаллов и иметь доступ к участку сборки интегральных схем. Банк кристаллов предполагает наличие шкафов хранения кристаллов в азотной контролируемой среде (срок хранения до 20 лет), которые расположены в климатизированном помещении с чистотой среды 10 000.

Для получения инженерного образца практически любой СвК потребуется ОКР в рамках всего 1–3 месяца с участием схемотехника, технолога и конструктора. После проведения испытаний можно начинать сборку требуемого количества изделий. Весь вопрос в наличии подходящего кристалла, поскольку почти всегда находится стандартный отечественный корпус.

Накопление кристаллов в банке – процесс постоянный и целенаправленный. Это не разовое мероприятие, а объект специализированной деятельности, использующий возможности всего отечественного и мирового рынков. К примеру, компания ООО «Космос Комплект», после организации своего банка кристаллов в 2015 г., за 5 лет работы накопила более 30 типов кристаллов с различным размером партии от 150 до 5000 шт. в том числе СОЗУ, MRAM, Flash, операционные усилители, контроллеры, микропроцессоры и др., которые отвечают спектральным требованиям космической промышленности. Компания уже собрала на базе своего банка кристаллов и предлагает на отечественном рынке 8-канальный датчик тока с выходом по напряжению, 16 М СОЗУ и 16 М MRAM.

Наличие необходимых кристаллов и налаженный процесс сборки позволяет в течение нескольких месяцев удовлетворить запрос разработчика аппаратуры на заказанную микросхему.

Технология СвК – самый эффективный на сегодня со всех точек зрения подход к реализации инновационной стратегии «системная миниатюризация» при разработке аппаратуры космического назначения. Ведь в одном корпусе можно собрать целые узлы и даже устройства с редуцированными габаритами, весом,

энергопотреблением и одновременно с этим значительно увеличенной функциональностью на единице конструктивного объема.

ВЫВОДЫ

На основании вышесказанного можно сделать несколько выводов:

- Воспроизводить микросхемы, которые доступны на мировом рынке и которые востребованы в малом количестве при большом числе типонаименований – дорого и долго, а, следовательно, и нецелесообразно. При таком подходе отечественные ресурсы по проектированию и производству ЭКБ, с одной стороны, полностью загружены, с другой – гарантированно отстают от мирового уровня и выпускают морально устаревшие изделия. Стоит разрабатывать только новые для рынка изделия;

- Необходимо срочно определить структуры, которые могли бы целенаправленно и постоянно собирать кристаллы на всех рынках и сохранять их в соответствующих банках. Заказы на кристаллы формируются разработчиками аппаратуры по текущим потребностям, установленным перечням и потребностям перспективных исследований;

- В структурах, которые будут связаны с содержанием банков кристаллов, необходимо сформировать группы для разработки инженерных образцов по технологии СвК (в составе схемотехника, технолог и конструктор) с последующей передачей проекта на сборочное производство;

- Выполнение вышеуказанных рекомендаций обеспечит достижение преимуществ целого ряда эффектов – длительность цикла «проектирование – производство» партии микросхем от 6 до 12 месяцев, снижение себестоимости продукции в несколько раз, возможность начать производство новой партии микросхем в течение нескольких дней после заявки, возможность избежать неблагоприятных стечений обстоятельств на мировом рынке и др.

- Применение банков с кристаллами и технологию СвК следует немедленно ввести в практику отрасли отечественной микроэлектроники, что обеспечит высокую экономическую эффективность воспроизведения стандартных микросхем и возможность реализации инновационных решений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабилов И.Х.** Инновационные космические микросистемы в корпусе – М.: Издательский дом «Спектр», 2011 г., 70 стр.
2. **Данилин Н.С.** Системная микроминиатюризация и малые спутники – М.: Издательский дом «Спектр», 2013 г., 54 стр.
3. **Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Сабилов И.Х.** Практическая методология разработки систем в корпусе. – М.: Издательский дом «Спектр», 2019 г., 110 стр.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КМОП КНИ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К НАКОПЛЕННОЙ ДОЗЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе рассмотрены методы повышения стойкости интегральных микросхем к ионизирующему излучению, реализованные на базе КНИ КМОП технологии. Дается описание основных эффектов, возникающих в КНИ КМОП транзисторах при взаимодействии с ионизирующим излучением космического пространства. Представлен ряд приемов, позволяющих повысить радиационную стойкость ИМС на базе КНИ КМОП технологии. Анализируются перспективы развития изделий микроэлектроники с повышенной стойкостью к внешним воздействиям в условиях постоянного уменьшения проектных норм.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, КНИ КМОПТ, радиационная стойкость.

Сведения об авторах:

Лагаев Дмитрий Александрович, аспирант,

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), младший научный сотрудник ОПТМ, 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: dlagaev@niime.ru

Шелепин Николай Алексеевич, д.т.н., АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), первый заместитель генерального директора, 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, Тел. (495) 229-71-07, e-mail: nchelepin@niime.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ С ИСТОЧНИКОМ ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ICP/CVD НА ПЛАСТИНЫ ДИАМЕТРОМ ДО 300 ММ

Свойства и качество диэлектрических пленок, получаемых методом ICP/CVD, широко известны. Однако решение проблемы равномерности при переходе на пластины диаметром до 300 мм является непростой задачей. Целью данной работы была разработка реактора с уникальной системой равномерной подачи газа для низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектрических слоев на пластины диаметром до 300 мм.

Ключевые слова: ICPPECVD, низкотемпературное осаждение, диаметр пластин 300 мм.

Сведения об авторах:

Долгополов Владимир Миронович, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: step455@mail.ru

Одиноков Вадим Васильевич, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: vodinokov@niitm.ru

Иракин Павел Александрович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: irakinp@gmail.com

Варакин Виктор Михайлович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: varakinVM@yandex.ru

Усов Илья Андреевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: nou_name@mail.ru

Моргун Сергей Владимирович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: stalkersergey2@gmail.com

SOI CMOS TRANSISTORS WITH INCREASED HARDENING TO TOTAL DOSE RADIATION: TECHNOLOGY AND DESIGN

The paper discusses methods for increasing the tolerance of integrated circuits to ionizing radiation, implemented based on SOI CMOS technologies. The main effects in SOI CMOS transistors resulting from IC interaction with space ionizing radiation are considered. Some techniques are presented, which increasing the radiation tolerance of ICs based on SOI CMOS technology. The prospects for the development of microelectronics products with increased tolerance to total dose radiation in the conditions of constant scaling of the process node are analyzed.

Keywords: Ionizing radiation, SOI CMOS, radiation resistance.

Data of authors:

Dmitriy A. Lagaev, graduate student

«Molecular Electronics Research Institute», «MERI», SC, junior researcher, 124460, 1st Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: dlagaev@niime.ru

Nikolay A. Shelepin, Doctor in Technical Sciences

«Molecular Electronics Research Institute», «MERI», SC, 1st Deputy of General Director, 124460, 1st Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, Russia, Phone: +7(495) 229-71-07, e-mail: nchelepin@niime.ru

TECHNOLOGY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR LOW-TEMPERATURE PLASMA-CHEMICAL DEPOSITION OF DIELECTRIC LAYERS WITH A HIGH-DENSITY PLASMA SOURCE ICP/CVD ON PLATES WITH A DIAMETER OF UP TO 300 MM

The properties and quality of dielectric films obtained by ICP/CVD are widely known. However, solving the problem of uniformity when switching to plates with a diameter of up to 300 mm is not an easy task. The aim of this work was to develop a reactor with a unique uniform gas supply system for low-temperature plasma-chemical deposition of dielectric layers on wafers with a diameter of up to 300 mm.

Keywords: ICPPECVD, low temperature deposition, plate diameter 300 mm.

Data of authors:

Dolgoplov Vladimir Mironovich, candidate of Engineering sciences, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: step455@mail.ru

Odinokov Vadim Vasilievich, doctor of Engineering, professor, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: vodinokov@niitm.ru

Irakin Pavel Aleksandrovich, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: irakinp@gmail.com

Varakin Viktor Mikhailovich, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: varakinVM@yandex.ru

Usov Ilya Andreevich, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: nou_name@mail.ru

Morgun Sergey Vladimirovich, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: stalkersergey2@gmail.com

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.**Часть 3. Процессы с азотсодержащими предшественниками**

В третьей части обзора проанализированы процессы атомно-слоевого осаждения тонких пленок диоксида кремния с использованием азотсодержащих реагентов-предшественников с термической и плазменной активацией. Обсуждаются схемы роста, состав и свойства слоёв, проблемы характеризации и перспективы промышленного применения процессов.

Ключевые слова: диоксид кремния, тонкая пленка, атомно-слоевое осаждение, азотсодержащие предшественники.

Сведения об авторе:

Васильев Владислав Юрьевич, доктор химических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета, Заместитель генерального директора ООО «СибИС», 630049, г. Новосибирск, а/я 68, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Выполнен обзор информационных источников с глубиной поиска 25 лет по результатам экспериментальных исследований процессов атомно-слоевого осаждения тонких слоев нитрида кремния с термической и плазменной активацией для применения в современных микро- и нанoeлектронных технологиях.

Ключевые слова: микро- и нанoeлектроника, нитрид кремния, тонкие слои, атомно-слоевое осаждение, термическая активация, плазменная активация.

Сведения об авторе:

Васильев Владислав Юрьевич, доктор химических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета, Заместитель генерального директора ООО «СибИС», 630049, г. Новосибирск, а/я 68, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS.**PART 3. Processes with nitrogen-containing precursors**

In the third part of the review, the processes of atomic layer deposition of thin films of silicon dioxide using nitrogen-containing precursor reagents with thermal and plasma activation are analyzed. The growth schemes, the composition and properties of the films, the problems of characterization, and the prospects for industrial application of the processes are discussed.

Keywords: silicon dioxide, thin film, atomic layer deposition, nitrogen-contained precursors.

Data of the author:

Vladislav Yurievich Vasilyev, doctor of chemistry, Professor of Novosibirsk state technical university, deputy Director General SibIS LLC, Novosibirsk, Russian Federation, PO Box 68 Novosibirsk, 630049, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru

ATOMIC LAYER DEPOSITION OF SILICON DIOXIDE THIN FILMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS

A review of information sources with a search depth of 25 years is presented based on the experimental results of studies of atomic layer deposition of thin layers of silicon nitride with thermal and plasma activation for use in modern micro- and nanoelectronic technologies.

Keywords: micro- and nanoelectronics, silicon nitride, thin films, atomic layer deposition, thermal activation, plasma activation.

Data of the author:

Vladislav Yurievich Vasilyev, doctor of chemistry, Professor of Novosibirsk state technical university, Deputy Director General SibIS LLC, Novosibirsk, Russian Federation, PO Box 68 Novosibirsk, 630049, e-mail: vasilev@corp.nstu.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ТРАНСПОРТА ЗАРЯДА В БЕСФОРМОВОЧНОМ МЕМРИСТОРЕ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ МЕТАЛЛА ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА

Мемристорная резистивная память с произвольным доступом (ReRAM, Resistive Random Access Memory) вместе с памятью с изменением фазового состояния (PCM, Phase Change Memory), магниторезистивной памятью с произвольным доступом (MRAM, Magnetoresistive Random Access Memory), сегнетоэлектрической памятью (FeRAM, Ferroelectric Memories) [4] являются востребованными видами энергонезависимой памяти на новых альтернативных принципах. Нитрид кремния является перспективным резистивным переключающим слоем для мемристоров. В данной работе проведено экспериментальное исследование эффекта переключения и переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния для разных типов металла (Ni, Co, Cu) верхнего электрода.

Ключевые слова: ReRAM, PCM, MRAM, FeRAM, мемристор, нитрид кремния

Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, академик РАН, доктор технических наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: gkrasnikov@niime.ru

Орлов Олег Михайлович; кандидат технических наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: oorlov@niime.ru

Макеев Виктор Владимирович; кандидат технических наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, г. Зеленоград, Россия, 103460; e-mail: vmakeev@niime.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СЛОЕВ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА МИКРОРЕЛЬЕФНУЮ ПОДЛОЖКУ

Предложена модель формирования профиля слоев в траншее и на гребенчатой структуре кристаллов субмикронных интегральных схем. Модель учитывает скорость поверхностной диффузии адсорбированного реагента в соотношении со скоростью его превращения в конечный продукт. Дано уравнение показателя конформности, аппроксимирующее для различных типов слоев зависимость от энергии активации химической реакции и температуры осаждения. Представлены аналитические выражения и оценки профилей для одиночной траншеи и регулярной рельефной структуры, учитывающие эффект загрузки и геометрический фактор доставки реагента.

Ключевые слова: газофазное осаждение, профиль слоев, моделирование.

Сведения об авторе:

Евдокимов Владимир Лукьянович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: vevdokimov@niime.ru

RESEARCH OF THE SWITCHING EFFECT AND CHARGE TRANSPORT IN THE FORMING-FREE MEMORISTOR BASED ON SILICON NITRIDE WITH VARIOUS TYPES OF TOP ELECTRODE METAL

Memistor resistive random access memory (ReRAM) together phase change memory (PCM), magnetoresistive random access memory (MRAM), ferroelectric memory (FeRAM) are popular types of new alternative principles non-volatile memory. Silicon nitride is a promising resistive switching layer for memristors. In this work we conducted an experimental researches of the switching effect and charge transport in memristores based on silicon nitride for various types of metal of the top electrode (Ni, Co, Cu).

Keywords: ReRAM, PCM, MRAM, FeRAM, memristor, silicon nitride

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, academician of RAS; Dsc; Stock Company «Molecular Electronics Research Institute» (MERI); 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru

Orlov Oleg Mikhailovich, PhD; Stock Company «Molecular Electronics Research Institute» (MERI); 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: oorlov@niime.ru

Makeev Viktor Vladimirovich, PhD, Stock Company «Molecular Electronics Research Institute» (MERI); 1st Zapadny proezd 12/1, Zelenograd, Russia, 103460, e-mail: vmakeev@niime.ru

MODELING THE TOPOLOGICAL NON - UNIFORMITY OF THE LAYERS DEPOSITED FROM THE GAS PHASE ON A SUBSTRATE MICRORELIEF

A model for forming the profile of layers in the trench and on the comb structure of crystals of submicron integrated circuits is proposed. The model takes into account the rate of surface diffusion of the adsorbed reagent in relation to the rate of its transformation into the final product. An equation of the conformality index is given that approximates the dependence on the activation energy of the chemical reaction and the deposition temperature for different types of layers. Analytical expressions and estimates of profiles for a single trench and a regular relief structure are presented, taking into account the loading effect and the geometric factor of reagent delivery.

Keywords: gas-phase deposition, layer profile, modeling.

Data of the author:

Evdokimov Vladimir Lukyanovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1, e-mail: vevdokimov@niime.ru

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЗОПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С АДсорБИРОВАННОЙ ВОДОЙ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 233–273 К

Построена теоретическая модель прогнозирования значений компонент тензора (оператора) концентрации напряжений в мезопористых структурах на основе кремния с адсорбированной водой в интервале температур 233–273 К. Проведены численные модельные расчеты и исследованы зависимости значений компонент указанного тензора от объемного содержания воды в матрице пористого кремния.

Ключевые слова: пористый кремний, деионизированная вода, лед, матричный композит, тензор концентрации напряжений, моделирование.

Сведения об авторах:

Бардушкин Владимир Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедр «Высшая математика №2» и «Системная среда качества» МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: bardushkin@mail.ru

Шилиева Юлия Игоревна, кандидат химических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: shyliaeva@gmail.com;

Кочетыгов Андрей Александрович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: aakcht@gmail.com

Дронов Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: mfh.miet@gmail.com.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМ

В рамках работы продемонстрирована комбинация кластеризации и PCA для подготовки измерений к Correlation Power Analysis или Differential Power Analysis [1].

Ключевые слова: кластеризация, Principal Component Analysis, Side Channel Attacks.

Сведения об авторе:

Благодатов Виталий Витальевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд 12, стр. 1, e-mail: vblagodatov@niime.ru

STRESS CONCENTRATION IN MESOPOROUS SILICON-BASED STRUCTURES WITH ADSORBED WATER IN THE TEMPERATURE RANGE 233 – 273 K

A theoretical model is presented for predicting the values of tensor (operator) components of the stress concentration in mesoporous silicon-based structures with adsorbed water in the temperature range 233 – 273 K. Numerical calculations were carried out using the developed model. The dependences of values of the tensor components on the volumetric water content in the mesoporous silicon matrix were investigated.

Keywords: porous silicon, deionized water, ice, matrix composite, stress concentration tensor, simulation.

Data of authors:

Bardushkin Vladimir Valentinovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, docent, Professor departments of «Higher mathematics No. 2» and «System environment» quality MIET, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: bardushkin@mail.ru

Shyliaeva Yulia Igorevna, candidate of chemical Sciences, associate Professor, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: shyliaeva@gmail.com

Kochetigov Andrey Aleksandrovich, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: aakcht@gmail.com

Dronov Alexey Alekseevich, candidate of engineering, associate Professor, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: mfh.miet@gmail.com

SCA IMPROVED BY CLUSTERING AND PCA

In this paper we detail techniques of clustering and PCA that can be used for improving Side Channel Attacks [1].

Keywords: Clustering, Principal Component Analysis, Side Channel Attacks.

Data of the author:

Blagodatov Vitaliy Vitalyevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1-st Zapadny Proezd, Zelenograd, Moscow, 124460, e-mail: vblagodatov@niime.ru.

**ПРОБЛЕМА ВЫПУСКА КАЧЕСТВЕННЫХ МИКРОСХЕМ
ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

В статье рассмотрена проблема производства отечественных микросхем для применения в космической аппаратуре и возможные пути ее решения на основе технологии «система в корпусе».

Ключевые слова: микроэлектроника, микросхема, космическая аппаратура, система в корпусе.

Сведения об авторах:

*Данилин Николай Семенович, доктор технических наук, профессор,
Акционерное общество «Российские космические системы»,
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, e-mail: n_danilin@rambler.ru*

*Димитров Димитр Милан, доктор технических наук, профессор,
Общество с ограниченной ответственностью «Космос Комплект»,
125466, г. Москва, ул. Соколово-Мещерская, д. 14, оф. 9,
e-mail: office@dimitrov.ca;*

*Булаев Иван Юрьевич, Акционерное общество «Российские космические системы»,
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, e-mail: bulaev.ivan@gmail.com*

**THE HIGH-QUALITY MICROCIRCUITS FOR RUSSIAN
MICROELECTRONICS PRODUCTION PROBLEM**

The article discusses the Russian microcircuits for space equipment production problem and possible solutions based on technology «system in package».

Keywords: microelectronics, microcircuit, space equipment, system in package.

Data of authors:

*Danilin Nikolay Semenovich, doctor of engineering, professor,
Join Stock Company «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya str.,
Moscow, 111250, e-mail: n_danilin@rambler.ru*

*Dimitrov Dimitr Milan, doctor of engineering, professor, Limited liability company
«Cosmos Complect» Ltd, 14, Sokolovo-Meshcherskaya str., Moscow, 125466,
e-mail: office@dimitrov.ca*

*Bulaev Ivan Yurievich Join Stock Company «Russian Space Systems»,
53, Aviamotornaya str., Moscow, 111250, e-mail: bulaev.ivan@gmail.com*

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3.
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ©**

Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 14 августа 2013 г., ПИ №ФС77-55092.

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 30.03.2020.

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»
(Типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6

Тираж 500 экз. Цена договорная.

© При перепечатке ссылка на журнал «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА» обязательна. Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. Рукописи рецензируются, но не возвращаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

ИЗДАТЕЛЬ

ФГУП «Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: info@naukaran.com
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>