

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 22. №1. 2020



Рисунок к статье В. М. Егоренкова, Н. В. Прудникова

«ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЕВ ИЗОТОПА ^{241}Am ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ»

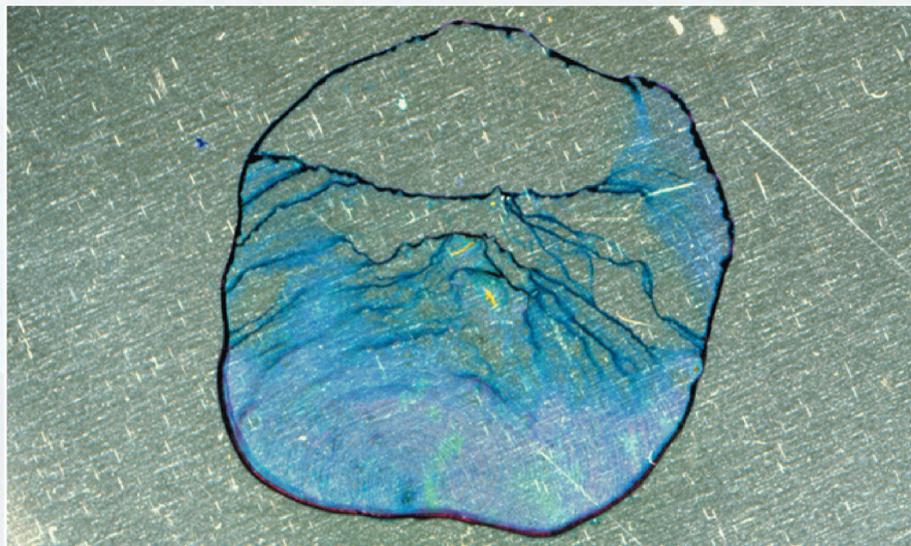


Рис. 1. Пятно активного слоя ^{241}Am , полученное выпариванием азотнокислого раствора на подложке (нержавеющая сталь) с добавлением контрастного красителя

Рисунок к статье А. А. Пустовалова, Л. А. Цветкова

«ВЫСОКООБОГАЩЕННЫЙ НИКЕЛЬ-63 И ТРИТИЙ – БЕЗАЛЬТЕРНАТИВНАЯ ОСНОВА КРУПНОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ»

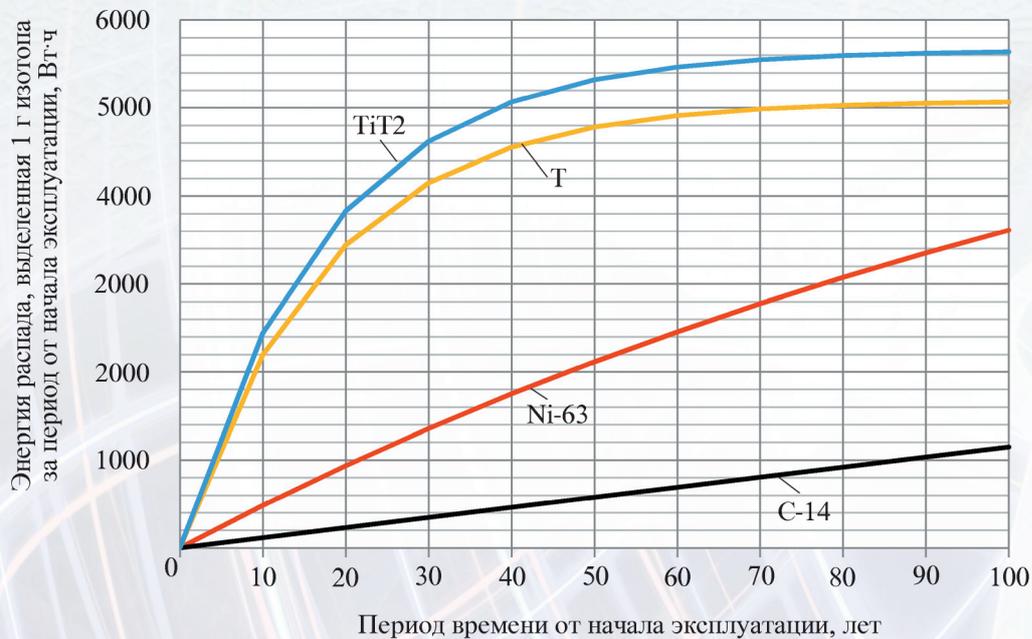


Рис. 1. Сравнение энергетической эффективности β -активных радионуклидов

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 22. № 1 ✧ 2020

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC.

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук.

Статьи имеют DOI.

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Чапльгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.т.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Ларионов Ю. В. Сравнение размеров, полученных с помощью растрового и просвечивающего электронных микроскопов, в диапазоне менее 50 нм: анализ результатов 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Редькин С. В. Упрощенная модель расчета параметров плазменного технологического процесса формирования кубического карбида кремния 11

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В. Электрохимическое осаждение пленок сплава NiFe из хлоридного электролита с низкой концентрацией основных солей 15

Егоренков В. М., Прудников Н. В. Исследование и оптимизация слоев изотопа ^{241}Am для создания источников тока на основе ядерной энергии 27

Пустовалов А. А., Цветков Л. А. Высокообогащенный никель-63 и тритий — безальтернативная основа крупносерийного производства бета-вольтаических атомных батарей 34

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Тиняев В. А., Эль-Хажж Х. М. Анализ эффективности методов снижения энергопотребления цифровых СБИС 39

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть I 46

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив статей с 1999 г."

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 22

No. 1

2020

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
 Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
 Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
 Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
 Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
 Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
 Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
 Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
 Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
 Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)
 Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
 Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.
 Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
 Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
 Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
 Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
 Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
 Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
 Singh K., PhD (India)
 Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
 Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
 Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
 Lysenko A. V. (Executive secretary)
 Chugunova A. V. (Research Editor)
 Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Larionov Yu. V. A Comparison of Linewidth in the Range less 50 nm Obtained with Help of Scanning and Transmission Electron Microscopes: Result Analysis 3

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Red'kin S. V. A Simplified Model of Calculating the Parameters of Plasma Process Formation of Cubic Silicon Carbide on Silicon 11

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V., Kasakov Iu. V. Electrochemical Deposition of NiFe Alloy Films of Chloride Electrolyte Containing Low Concentration of Basic Salts 15

Egorenkov V. M., Prudnikov N. V. Study and Optimization of ²⁴¹Am Isotope Layers for Creation of Sources of Electric Current Based on Nuclear Energy 27

Pustovalov A. A., Tsvetkov L. A. Highly Enriched Nickel-63 and Tritium — Non-Alternative Basis Mass Production Beta-Voltaic Batteries 34

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Tinyaev V. A., El-Khajj K. M. Analysis of the Power Minimization Methods Efficiency for Digital VLSI Circuits 39

BIOELECTRONICS

Abramov I. I. Prospects and Problems of Supermind Development. Part I 46

Web: www.microsystems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 537.533.35

DOI: 10.17587/nmst.22.3-10

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотр., luv@kapella.gpi.ru,
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

СРАВНЕНИЕ РАЗМЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РАСТРОВОГО И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ, В ДИАПАЗОНЕ МЕНЕЕ 50 нм: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поступила в редакцию 17.10.2019

Ранее было выявлено, что значения ширины одного нановыступа, измеренные электронными микроскопами разного типа, заметно различаются. Показано, что одна из причин этого — несовершенство модели физических процессов, описывающих формирование изображения в растровом электронном микроскопе (РЭМ), а также несовершенство метода РЭМ-измерения ширины. Другая причина — технологическая изменчивость профиля нановыступа, которую сложно учесть в модели РЭМ-измерений. Разумно отказаться от поиска источников методической погрешности РЭМ-измерений и калибровать РЭМ по данным более совершенного измерителя, в частности, с помощью просвечивающего микроскопа. Однако результат калибровки будет зависеть от профиля выступа.

Ключевые слова: нанометрология, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ), растровый электронный микроскоп (РЭМ)

Введение

В работе [1] были представлены ПЭМ- и РЭМ-изображения одних и тех же выступов с размерами менее 50 нм. Выступы являлись топологическими элементами тест-объекта меры МШПС-2М. Из анализа их ПЭМ-изображений выяснилось, что реальные профили выступов отличаются от модельного профиля, используемого для расчета размеров при РЭМ-измерениях вплоть до 10 нм [2]. До работы [1] соответствие профиля выступов, сформированного с помощью анизотропного травления, модели идеальной трапеции ранее просто постулировалось ввиду отсутствия ПЭМ-изображений таких выступов.

В работе [1] была предложена геометрическая величина, которую можно использовать в качестве ширины верхнего основания (ВО) нанометрового выступа. К этой ширине верхнего основания были отнесены данные измерения, полу-

ченные в работе [1] с помощью РЭМ и ПЭМ. Для РЭМ эта величина подобна ширине в модели идеальной трапеции в работе [2]. Это позволило использовать уже разработанный и используемый алгоритм для ее измерений. При этом разница между значениями для нового определения ширины и измеренного с помощью РЭМ с используемым алгоритмом измерений воспринималась как методическая погрешность, которую надо корректировать по данным измерений более совершенного средства измерений. При ПЭМ-измерениях вновь введенную ширину определяли по изображению профиля выступа и калибровали через период решетки кремния. При этом учитывалось, что значения ширины обоих средств измерений должны отличаться ввиду влияющего на результат РЭМ-измерений слоя контаминационной пленки на поверхности выступа и отсутствия его влияния на результат на ПЭМ-изображении. Оценка этой составляющей

разницы ПЭМ- и РЭМ-значений ширины была проведена отдельно по результатам сторонних измерений толщины контаминационной пленки, осаждаемой при РЭМ-измерениях.

В работе [1] были оценены неопределенности для каждого метода измерения, связанные с использованием значения нового определения ширины выступа. Эта неопределенность измерений должна учитываться при рассмотрении полного бюджета неопределенности измерений размеров реального профиля в каждом из методов. Эта неопределенность вносит вклад в разницу ПЭМ- и РЭМ-значений ширины, определяемую в эксперименте.

Полученные ПЭМ-значения были использованы как опорные при сравнении с РЭМ-значениями ширины этих же выступов. В работе [1] были представлены такие методические приемы РЭМ-измерений и такие варианты алгоритмов расчетов, которые позволили сблизить РЭМ- и ПЭМ-значения ширины. В результате этого усредненные по всем выступам РЭМ- и ПЭМ-значения ширины практически совпали. При этом для отдельных выступов в наборе измеренных нами, которые отличались по профилю и от среднего значения ширины, обнаружилась разница между РЭМ- и ПЭМ-значениями, достигающая приблизительного ± 5 нм.

Задача данной работы — анализ несовершенств модели формирования РЭМ-изображений и алгоритмов расчета ширины в работе [2], которые приводят к разнице ПЭМ- и РЭМ-значений ширины, а также описание методических приемов, которые позволяют сблизить усредненные РЭМ- и ПЭМ-значения.

Анализ несовершенств модели РЭМ-измерений

1. *Критика модели соответствия точек кривой ВС точкам профиля выступа.* Один из основных моментов в концепции РЭМ-измерений в работе [2] — априорное представление о соответствии легко выделяемых ("особых") точек на кривой видеосигнала угловым точкам модельной трапеции, которая якобы отображает профиль сечения реального выступа. Такие точки кривой ВС являются далее опорными для определения как диаметра электронного пучка (с размерами в несколько нанометров), так и геометрических размеров всех участков модельной трапеции (с использованием размера пучка). Определение положения опорных точек на кривой ВС с субнанометровой точностью является сложной мето-

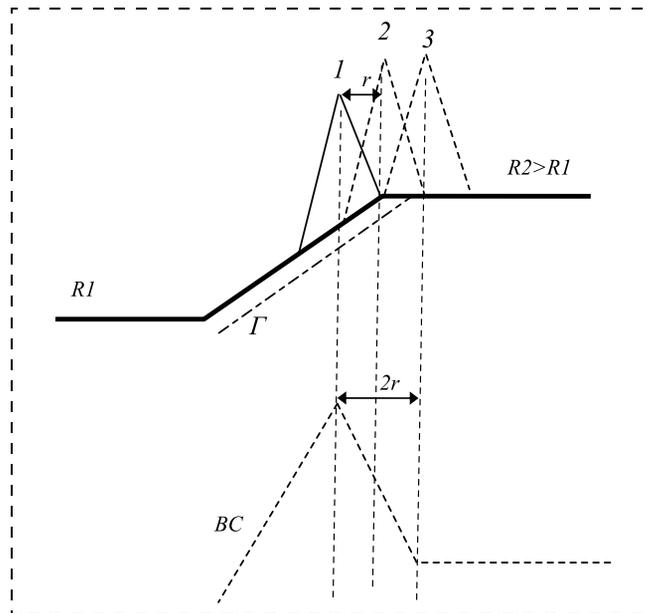


Рис. 1. Схема профиля части боковой стенки выступа и соответствующего ей участка кривой ВС согласно [2]:

$R1$ и $R2$ — коэффициенты эмиссии МВЭ из верхнего и нижнего плато соответственно, r — радиус пучка МВЭ; Γ — глубина выхода МВЭ; ВС — видеосигнал

дической задачей. Поэтому в работе [3] вводится упрощенный алгоритм определения положения таких точек, что заметно облегчает измерение ширины выступа.

Рассмотрим несовершенство представления в работе [2] о соответствии опорных точек кривой ВС угловым точкам идеального трапецеидального выступа. На рис. 1 показаны схема участка профиля выступа вблизи его верхнего левого угла и изменение амплитуды ВС при сканировании этого участка профиля электронным пучком. При перемещении пучка вверх по боковой стенке от позиции 1 к позиции 3 (его последовательные положения обозначены треугольниками у левого угла выступа) происходит рост амплитуды ВС до момента касания правым краем пучка левого края верхнего основания. В соответствии с моделью работы [2] эмиссия медленных вторичных электронов (МВЭ) из нижнего и верхнего оснований выступа $R1$ меньше эмиссии $R2$ из боковой стенки, причем при переходе от меньшего значения к большему и, наоборот, на углах профиля она изменяется скачком. Поэтому с момента касания пучком левого верхнего угла выступа (позиция 1 пучка на рис. 1) начнется спад амплитуды ВС. Когда же левый край пучка достигает угла выступа (позиция 3 пучка на рис. 1), то уменьшение амплитуды ВС резко прекращается, так как далее верхнее основание

(с размером более диаметра пучка) сканируется с постоянной эмиссией $R2$. В модели постулируется, что при совмещении середины пучка с углом трапеции (позиция 2 пучка на рис. 1) амплитуда видеосигнала достигает середины участка ее спада на участке от максимума до плато ВС. Из рис. 1 видно, что ширина этого участка спада амплитуды ВС соответствует диаметру пучка. В соответствии с этой моделью ширина ВО выступа определяется как расстояние между максимумами кривой ВС без ширины участка спада амплитуды (с учетом увеличения РЭМ).

Такое представление об изменении амплитуды ВС наглядно и удобно для создания практической методики проведения измерений. В действительности изменение эмиссии МВЭ на сторонах угла выступа не происходит резко при сканировании угловой точки выступа, а сама угловая точка является элементом модели профиля. Одна из причин плавного изменения эмиссии МВЭ на углу выступа в том, что она исходит не из бесконечно тонкого участка поверхности, а из слоя глубиной 3...5 нм под ней. В результате, при достижении правой границей пучка левого края ВО, часть МВЭ уже выходит из ВО, а при сканировании ВО всем пучком часть МВЭ продолжают эмиссию из боковой стенки. А при ширине выступа, сравнимой с диаметром пучка, выход МВЭ из обеих сторон верхнего основания выступа должен вызывать увеличение эмиссии МВЭ и сместить пики кривой ВС к середине выступа.

В работе [3] проведено моделирование положения максимума пучка МВЭ, формируемого сканированием края прямоугольного выступа, и предсказано значение его смещения от края к середине выступа при вариации параметров сканирования РЭМ и выступа. Оказалось, что в диапазоне изменения этих параметров смещение максимума варьируется от единиц до нескольких десятков нанометров. Для выступа с наклонными боковыми стенками указанное смещение должно быть меньше, однако для используемых параметров сканирования и профиля структуры смещения максимума, насколько нам известно, не оценивалось. Отметим, что в модели работы [2] картина эмиссии МВЭ из угла выступа (и, соответственно, значение смещения максимума на кривой ВС от края верхнего основания) неизменна для любых углов трапеции, моделирующей профиль выступа.

В работе [1] были зафиксированы два типа профиля выступа меры у верхнего основания —

со скруглениями профиля на углах (далее с "фаской") и с пьедесталом верхнего основания над боковыми стенками выступа (далее с "феской"). Вариация профиля края должна влиять на амплитуду в максимумах кривой ВС и степень смещения положения максимумов относительно углов выступа.

Существует и другая причина смещения положения максимума на кривой ВС от соответствующего его положения в модельной кривой. Она связана с ростом амплитуды ВС при движении пучка вверх по боковой стенке выступа. При приближении пучка к углу трапеции происходит рост амплитуды ВС вследствие увеличения числа вторичных электронов, достигающих боковой стенки из глубины подложки и вызывающих прирост эмиссии МВЭ из нее. Вследствие этого спад амплитуды ВС в момент, когда правая граница пучка касается левого края верхнего основания, должен происходить с запаздыванием. Максимум амплитуды и в этом случае должен смещаться вправо относительно модельного. Этот сдвиг должен зависеть от режима работы РЭМ и от параметров выступа.

Смещение максимумов эмиссии МВЭ к середине изображения выступа относительно его углов (в масштабе профиля выступа) можно видеть на серии кривых, полученных моделированием выхода вторичных электронов из угла выступа методом Монте-Карло [5, fig. 20]. В результате такого смещения значение ширины верхнего основания, определенное с использованием алгоритма работы [2], оказалось меньше заданной в модели работы [5] ширины этого выступа на ~16 нм (при ширине выступа 40 нм).

Направление смещения максимумов амплитуды ВС относительно углов верхнего основания можно оценить и экспериментально, сравнивая расстояния между максимумами на кривой ВС (в масштабе выступа) и ширину верхнего основания, измеренную с помощью ПЭМ. В табл. 1 работы [1] приведены расстояния L_p между максимумами на кривых ВС в масштабе выступа с ПЭМ-размерами верхнего основания W . Оказалось, что максимумы расположены в пределах верхнего основания для всех выступов, кроме выступов с наименьшей шириной $W = 17$ нм с профилем в виде фески и с $W = 19$ нм с профилем в виде фаски. Смещение положения максимумов к центру изображения относительно границ верхнего основания (определяемое как половина разницы L_p/M и W) составило 1,5...2,5 нм для всех выступов кроме двух с минимальной

шириной. Эти оценки сделаны без учета уширения выступов вследствие осаждения контаминационной пленки. Для всех контаминированных выступов (после однократного их сканирования в РЭМ и увеличения в результате этого ширины на $\sim 0,7$ нм) смещение максимумов к середине должно составить $+2,2\dots+3,2$ нм, а на выступах с минимальными размерами приблизительно $+0,7$ и $-1,4$ нм. Таким образом, лишь для выступа с фаской с шириной верхнего основания около 20 нм положение максимумов эмиссии МВЭ (и соответствующих им пиков кривой ВС в масштабе объекта сканирования) качественно соотносится с положением углов выступа в соответствии с моделью [2].

То, что положение максимумов кривой ВС по отношению к углам выступа в работе [2] предсказано неверно, подтверждается сопоставлением результатов измерений ширины выступов тест-объектов меры МШПС-2К с использованием модели измерений в [2] и полученных с помощью другого средства измерений [6], а также в модельных экспериментах [6, 7]. И в этих сопоставлениях использование модели измерения [2] привело к заниженным значениям ширины при измерениях ширины ВО. Эмиссию МВЭ из углов выступов необходимо определять более совершенным способом, например с помощью моделирования ее методом Монте-Карло.

2. Критика варианта измерения эффективного диаметра. Важнейшей величиной для измерения геометрических размеров выступов в нанометровом диапазоне является диаметр электронного пучка РЭМ. Для измерения размеров в работе [2] используется эффективный диаметр пучка МВЭ, выходящего из поверхности, который, априорно совпадая с падающим пучком РЭМ, определяется по фрагментам кривой ВС. В работе [8] представлено, что возможны два способа его измерения по двум разным парам опорных точек на кривой ВС. На рис. 2, а показаны эти пары опорных точек: 1–2 (или 7–8) и точки 3–4 (или 5–6), которые показаны также на рис. 2, б, по расстоянию между которыми с учетом увеличения РЭМ оси X , можно определить соответственно два значения эффективного диаметра — D_i или D_h . Поскольку на границах указанных отрезков кривая ВС изменяется нелинейно и с шумами, то это затрудняет определение точного положения опорных точек.

Для упрощения их поиска участки кривых, соединяющих пары указанных точек, аппроксимируются в работе [3] прямыми. Ширина про-

екции этих прямых и определяет значение эффективного диаметра. Аппроксимация участков кривых ВС прямыми проводится по средней части этих участков, которые наиболее близки по форме к прямым, с использованием метода наименьших квадратов. При этом происходит исключение концевых отрезков участков кривых, наиболее отличных от прямой. Далее следует экстраполяция участков прямых до пересечения с соседними аппроксимированными прямыми. Выбор длины средней части участка кривой ВС, который подвергается аппроксимации, определяется парой точек на этом участке кривой, равноотстоящих от его середины (на рис. 2, а, б обозначенных как C). Расположение этих точек

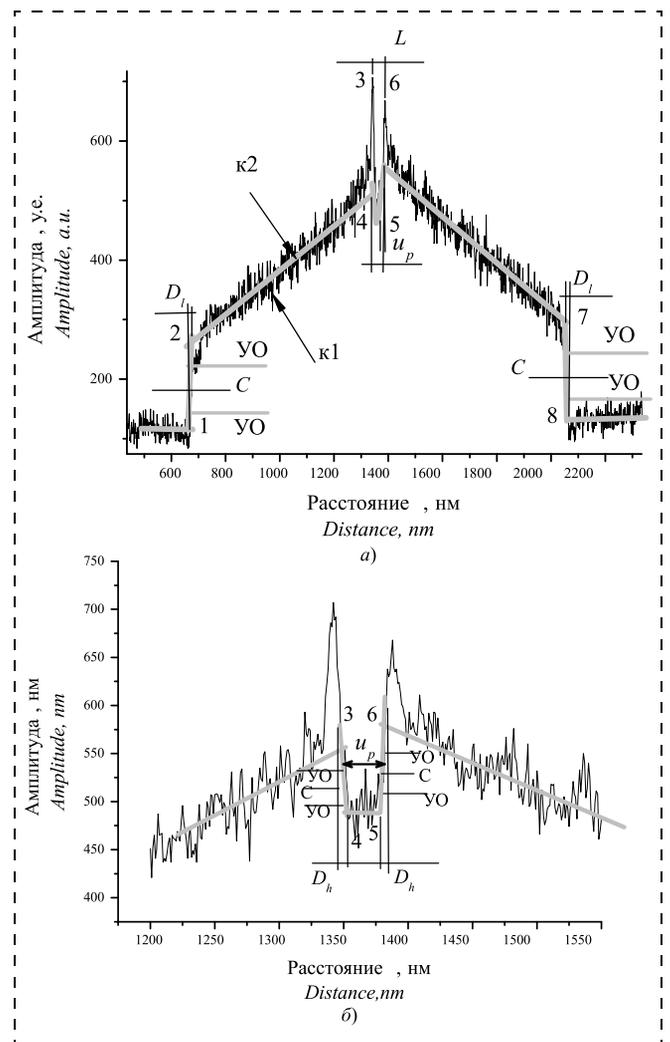


Рис. 2. Кривая видеосигнала для выступа шириной около 50 нм (а) и верхняя увеличенная ее часть (б):

$k1$ — экспериментальная; $k2$ — модельная; 1–8 — опорные точки; $УО$ — уровень отсечки; C — середина аппроксимируемого участка кривой; u_p — ширина верхнего основания выступа; L — расстояние между пиками кривой видеосигнала; D_h, D_i — модельные значения диаметра электронного пучка

задается оператором с помощью параметра "уровень отсечки" амплитуды ВС. Уровень отсечки (УО на рис. 2) — относительная величина и задается как процент отношения длины участка кривой, которая ограничена указанными точками, ко всей его длине и изменяется от 0 (когда уровни отсечки совпадают со серединой участка) до 100 % (когда уровни отсечки совпадают с концами этого участка). Выбор уровня отсечки влияет на значения D_l и D_h эффективного диаметра и, соответственно, на значение ширины $u_p(O)$, зависящей от значения отсечки O .

Положение опорных точек зависит не только от выбора оператора, но и от условий измерений, от вариации профиля выступа вблизи угловых точек в сечении выступа. На рис. 3 представлены зависимости РЭМ-ширины от отсечки $u_p(O)$, полученные из экспериментальных кривых ВС, при использовании для расчета ширины значений D_h и D_l . Эти зависимости получены для выступов с профилем в виде фески и фаски. Значения ширины W , определенные с помощью ПЭМ, отмечены с правой стороны поля графика серыми символами: квадратами для выступов с феской и треугольниками для выступов с фаской (форма символов подобна форме профиля). Из рис. 3 видно, что с увеличением отсечки значения u_p на всех кривых увеличиваются. Это увеличение вызвано в первую очередь соответствующим уменьшением значений D_h и D_l , так как

$$u_p = (L_p - D_l)/M, \quad (1)$$

где L_p — расстояние между пиками амплитуды на кривой ВС; M — увеличение РЭМ [2].

Отметим характерные особенности в поведении кривых на рис. 3:

— РЭМ-значения ширины u_p почти для всех выступов и при всех уровнях отсечки остаются меньше ПЭМ-значений W (кроме выступа № 4 с наименьшей шириной ВО, равной ~19 нм и с профилем в виде фаски). Действительно, u_p при использовании D_l меньше соответствующих значений u_p при D_h на ~10 нм (рис. 3, кривые $10D_h$ ■ и $10D_l$ □ и, соответственно, $8D_h$ ■ и $8D_l$ □ с соответствующими символами; обозначения 10 и 8 указывают номер выступа в табл. 1 работы [1]). Это соотношение в значениях ширины u_p при использовании D_h и D_l мы объяснили дефокусировкой падающего электронного пучка (фокусируемого до начала измерений на верхнее основание выступа) при сканировании участков выступа вблизи нижнего основания [9]. Исполь-

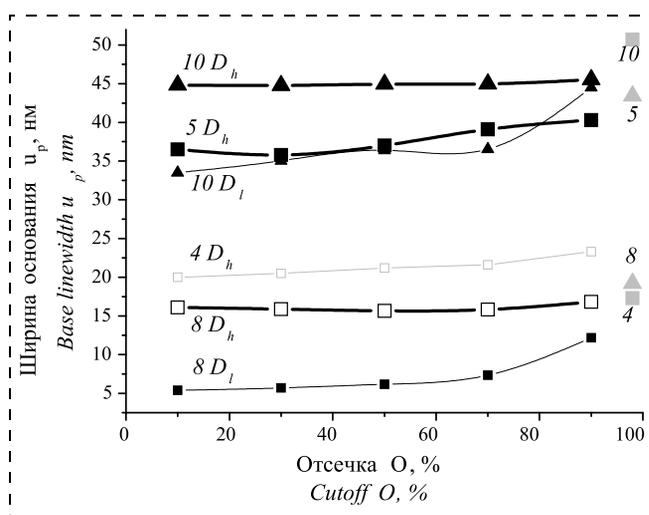


Рис. 3. Зависимости ширины от отсечки $u_p(O)$ для выступов с профилем в форме "фески" (данные обозначены квадратами: при использовании D_h символами ■, при использовании D_l — символами □), а для выступов с профилем в форме "фаски" данные обозначены треугольниками (для D_h и D_l — отображены соответствующими символами ▲ и △). Каждая кривая обозначена номером, соответствующим номеру выступа в табл. 1 [1] и типом эффективного диаметра (D_h или D_l). С правой стороны поля символами в виде серых квадратов и треугольников обозначены ПЭМ-значения ширины для выступов с соответствующим профилем. Номера рядом с этими символами соответствуют номерам выступов

зование D_h приводит также к меньшему отличию ширины $u_p(O)$ от опорной величины W по сравнению с использованием D_l . Наименьшие отличия в значениях ширины достигаются вблизи значения отсечки 90 % при использовании и D_h , и D_l (кроме указанного выступа № 4 с шириной ~19 нм);

— характер изменения $u_p(O)$ с увеличением отсечки зависит от профиля верхнего основания и от выбора типа эффективного диаметра D_h или D_l . При использовании D_h кривые слабее зависят от отсечки, чем при использовании D_l (сравните кривые $10D_h$ и $8D_h$ со знаками ■ и кривые $10D_l$ и $8D_l$ со знаками □). При выборе значения D_h кривые для выступов с феской (со знаками ■) изменяются менее резко, чем для выступов с фаской (помеченные знаками ▲, сравни кривые $5D_h$ и $10D_h$, $4D_h$ и $8D_h$);

— выяснилось, что и случайная составляющая неопределенности измерения D_h (и соответствующая неопределенности ширины выступа u_p) существенно зависит от профиля выступа. Так, если отношение случайной неопределенности измерения среднего $\sigma(D_h)$ к среднему значению D_h (т. е. $\sigma D_h/D_h$) для образца с феской составляет 7...10 %, то для образца с фаской — до 30 %. От-

меченные закономерности объясняются динамической изменением кривых ВС на участках, соответствующих краям выступов: чем круче эта зависимость (на верхней части кривой для выступов с феской), тем слабее зависимость от отсечки и меньше случайная погрешность измерений;

— на выбор величин D_h или D_p при измерении ширины способен повлиять также характер их изменения при образовании контаминационной пленки. Мы исследовали вариацию D_h и D_p , а также вариацию ширины верхнего основания $u_p(D_h)$ и $u_p(D_p)$ в зависимости от числа сканирований выступа. Указанные зависимости представлены на рис. 4 (значения $u_p(D_h)$ и $u_p(D_p)$ уменьшены в 10 раз для удобства представления их вместе с величинами D_h и D_p). Видно, что D_h более заметно изменяется от числа сканов (на 7 нм за 30 сканов, кривая 2), менее заметно (на ~3 нм) изменяется D_p (кривая 1). Это означает, что изменения профиля выступа при росте контаминационной пленки вблизи внешних углов выступа происходят более активно, чем около внутренних углов. При этом значения $u_p(D_h)$ и $u_p(D_p)$ (кривые 3 и 4) увеличиваются на 5 и 7 нм соответственно (степень увеличения u_p на кривых 3 и 4 надо увеличить в 10 раз). Причиной роста является увеличение расстояния между опорными точками L_p вследствие уширения выступа. Поскольку увеличение D_h происходит более активно по срав-

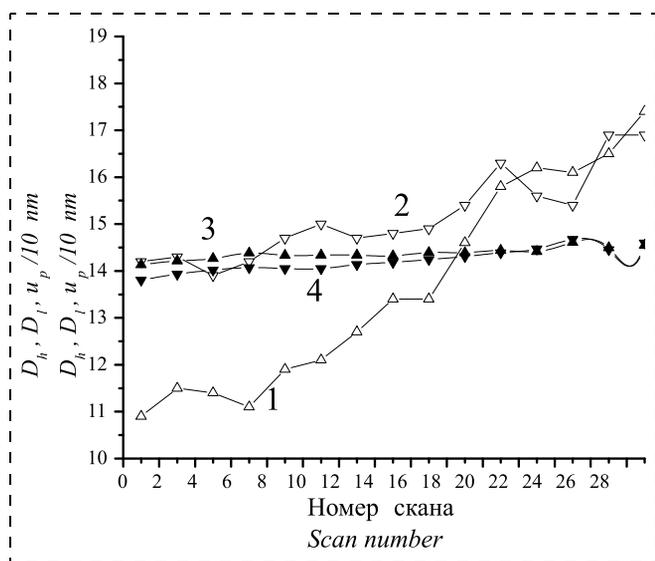


Рис. 4. Вариация зависимостей от числа сканов при многократном сканировании выступа:

кривые 1 и 2 — для диаметров D_h , D_p , кривые 3 и 4 — для ширины $u_p(D_h)/10$ и $u_p(D_p)/10$ (значения уменьшены в 10 раз). Рост D_h более активен по сравнению с D_p , $u_p(D_h)$ растет слабее $u_p(D_p)$

нению с D_p , то изменения $u_p(D_h)$ в соответствии с выражением (1) при росте пленки проявляются слабее. Поэтому использование величины D_h при измерении ширины более предпочтительно.

В наших условиях измерений использование в качестве эффективного диаметра величины D_p , предложенное в работе [2], оказалось менее удобным по сравнению с использованием D_h . Ситуация может быть иной, если наноразмерные выступы измеряются с большим диаметром падающего электронного пучка РЭМ.

3. Критика использования параметра "отсечка". Упрощения в картине эмиссии МВЭ из выступа в работе [2] дополняются упрощениями в алгоритме расчета ширины, позволяя достичь результата предельно простым способом.

Упрощение алгоритма расчетов достигается использованием процедуры линеаризации участков кривой ВС [3], приводящей к нахождению опорных точек, расстояние между которыми и определяет ширину верхнего основания (вместо расстояния между максимумами кривой с учетом значения диаметра пучка в модели эмиссии МВЭ из выступа [2]). Замена положений максимума (плохо воспроизводимых из-за шумов ВС) на положение опорных точек приводит к более стабильному значению ширины выступов. Однако положение выбранных опорных точек уже не связано с положением углов выступа, даже в рамках упрощенной модели эмиссии МВЭ.

Линеаризация кривой ВС формально приводит к замене пучка МВЭ из выступа модельным прямоугольным пучком с равномерной плотностью электронов в нем [10], размер которого определяется значением эффективного диаметра. Замена максимумов кривой ВС на опорные точки, а пучка МВЭ на модельный пучок с прямоугольным профилем приводит к появлению в расчетах добавочной величины — настроечного параметра "отсечка", и ширина выступа u_p становится ее функцией.

Рассчитать значение отсечки до проведения измерений ширины, используя модель формирования ВС, практически невозможно. Мы экспериментально выбирали значение отсечки до проведения измерений ширины по результатам калибровки РЭМ-значений соответствующими ПЭМ-значениями. Выявилось, что диапазон изменения РЭМ-значений ширины при вариации отсечки недостаточен для достижения соответствующих ПЭМ-значений. В результате даже откалиброванные РЭМ-значения ширины при предельных значениях отсечки почти всегда оказы-

ваются меньше ПЭМ-значений и во всех случаях меньше значений ширины, если учитывать контаминационное уширение выступа. Поэтому следует вообще отказаться от использования отсечки для коррекции РЭМ-значений ширины и воспользоваться регрессионной зависимостью между РЭМ- и ПЭМ-значениями ширины, как в работе [11]. При использовании РЭМ с большим диаметром пучка определение отсечки будет усложнено вследствие того, что максимумы кривой ВС, соответствующие краям выступа, могут не разрешаться.

Заключение

Анализ результатов РЭМ-измерений ширины нанометровых выступов выявил, что модель эмиссии МВЭ в работе [2], примененная к описанию формирования изображения таких объектов, не отражает в нужной степени картины физических процессов, происходящих в них при рассеянии падающего пучка РЭМ. В результате точки на кривой видеосигнала (сформированные на основе РЭМ-изображения и рекомендованные для измерения размеров в работе [2]) и точки профиля нановыступа, модельно им соответствующие, реально отделены друг от друга на нанометры (в масштабе выступа). Степень несоответствия между такими точками определяется также алгоритмом расчетов ширины выступа, который сильно упрощен и не в полной мере соответствует даже созданной модели эмиссии МВЭ из выступа. Эти обстоятельства совместно обуславливают различие РЭМ- и ПЭМ-значений ширины.

Технологическая невоспроизводимость формы профиля выступа заметно влияет на измеряемые РЭМ-значения ширины верхнего основания, поскольку в расчетах РЭМ-изображения используется единственная модель профиля выступа. Влияния формы профиля на разницу ПЭМ- и РЭМ-значений ширины можно учесть методически, сформировав дополнительные калибровочные кривые для выступов с разными формами профиля. Однако обнаружить отклонения в форме профиля без предварительных ПЭМ-измерений затруднительно.

Разумно отказаться от модельного подхода при РЭМ-измерениях в нанометровом диапазоне и проводить калибровку РЭМ-значений по результатам измерений, полученных более точным способом измерений. Калибровка может быть проведена с использованием регрессионной за-

висимости между ПЭМ- и РЭМ-результатами измерения ширины. Такая зависимость будет чувствительна к форме профиля выступа.

Наибольшая близость между РЭМ- и ПЭМ-значениями ширины, а также меньшая случайная погрешность были обнаружены для выступов с профилем верхнего основания в форме фески (поднятие верхнего основания выступа над боковыми стенками на пьедестал). Сознательное формирование такого профиля выступа в мере ширины улучшило бы ее метрологические характеристики при РЭМ-измерениях. Профиль выступа меры в виде фески является близким к профилю выступа в мере SCCDRM (NIST) [12] (в противоположность к профилю в виде фаски), сохраняя при этом потенциальную возможность калибровки не только ширины верхнего основания, но и ширины боковых стенок и высоты выступа.

Список литературы

1. **Ларионов Ю. В.** Сравнение размеров, измеренных растровым и просвечивающим электронными микроскопами, в диапазоне менее 50 нм // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 11. С. 643–651.
2. **Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. В., Раков А. В.** и др. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36–76.
3. **Программа** анализа изображений микроскопов, программная платформа NDPL. <https://yadi.sk/i/YtOL8GEid9nK4>. 2009.
4. **Новиков Ю. А.** Моделирование формирования видеосигналов РЭМ методом Монте-Карло: вторичные медленные электроны // Поверхность. 1995. № 10. С. 58–64.
5. **Li Y. G., Mao S. F., Ding Z. J.** Monte-Carlo simulation of SEM and SAM Images. Applications in Monte-Carlo method in Science and Engineering. In Tech. DOI: 10.5772/1617. 2011. 65 p. available from <http://www.intechopen.com>.
6. **Frase C. G., Hassler H., Dai G.** et al. SEM linewidth measurements of anisotropically etched silicon structures smaller than 0.1 μm // Meas. Sci. Technol. 2007. Vol. 18. P. 439–447.
7. **Ларионов Ю. В.** Оценка диаметра пучка РЭМ по кривым видеосигнала от трапецеидальной структуры. 1. Модельный эксперимент // Поверхность. 2016. № 3. С. 87–97.
8. **Gavrilenko V. P., Filippov M. N., Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A.** Measurement of linear sizes of relief elements in nanometer range using a scanning electron microscope // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6648. P. 66489T1-12.
9. **Ларионов Ю. В.** Оценка диаметра пучка РЭМ по кривым видеосигнала от трапецеидальной структуры: 2. Эксперимент // Поверхность. 2016. № 12. С. 96–108.
10. **Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Плотников Ю. В., Раков А. В.** Проблемы измерения геомет-

рических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 77–120.

11. **Cresswell M. W., Allen R. A., Guthrie W. F.** et al. Comparison of SEM and HRTEM CD measurements extracted from test structures having features linewidth from

40 to 240 nm // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2008. Vol. 57, N. 1. P. 100–109.

12. **Dixon R. G., Guthrie W. F., Cresswell M. W.** et al. Single crystal critical reference material (SCCDRM): Process optimization for the next generation of standards // *Proc. of SPIE*. 2007. Vol. 6518. 651815, p. 1–11.

Yu. V. Larionov, Senior Researcher, luv@kapella.gpi.ru,
A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow

Corresponding author:

Larionov Yuriy V., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, 119991, Russian Federation.
E-mail: luv@kapella.gpi.ru

A Comparison of Linewidth in the Range less 50 nm Obtained with Help of Scanning and Transmission Electron Microscopes: Result Analysis

Received on October 17, 2019

Accepted on October 28, 2019

It was discovered previously that linewidth of a nano- protrusion measured with different types of electron microscopes are distinguished notably. A one of reasons for that is shown to be the imperfection of a model describing a SEM image formation and also the imperfection of the method of linewidth measurement for SEM. A different reason is the technological variability of nano-protrusion profile that one can take into account with difficult in a model of SEM measurement. It is reasonable to reject the pursuit of search for sources of methodical errors for the SEM measurements and calibrate a SEM with use of a more perfect measurement device in particular with use of a transmission microscope. Regression dependence in TEM and SEM data of measurements can be the best kind of calibration. The dependence should be defined by a protrusion profile. The best proximity in TEM and SEM values and the least random error are achieved for a protrusion upper base profile in the form of fez (tarboosh).

Keywords: nanometrology, transmission electron microscope (TEM), scanning electron microscope (SEM)

For citation:

Larionov Yu. V. A Comparison of Linewidth in the Range less 50 nm Obtained with Help of Scanning and Transmission Electron Microscopes: Result Analysis, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 3–10.

DOI: 10.17587/nmst.22.3-10

References

1. **Larionov Yu. V.** Svravnenie razmerov izmerennikh rastrovim I prosvetivayuschim mikroskopami v diapazone menee 50 nm, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 11, pp. 643–651 (in Russian).

2. **Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Plotnikov Yu. I., Rakov A. V.** Lineinaya mera mikrometrovogo i nanometrovoogo diapazonov dlya rastrovoy i atomno-silovoy mikroskopii, *Trudi IOFAN*, 2006, vol. 62, pp. 36–73 (in Russian).

3. **Programma analiza izobradzenii mikroskopov**, programnaya platforma NDPL. <https://yadi.sk/i/YtOL8GEid9nK4>. 2009.

4. **Novikov Yu. A.** Modelirovanie formirovaniia videosignalov REM metodom Monte Karl: vtorichnie meddleyieye elektroni, *Poverkhnost*, 1995, no. 10, pp. 58–64 (in Russian).

5. **Li Y. G., Mao S. F., Ding Z. J.** Monte-Carlo simulation of SEM and SAM Images. Applications in Monte-Carlo method in Science and Engineering. In Tech. DOI 10.5772/1617. 2011. 65p. available at: <http://www.intechopen.com>.

6. **Frase C. G., Hassler H., Dai G.** et al. SEM linewidth measurements of anisotropically etched silicon structures smaller than 0.1 μm , *Meas. Sci. Technol.*, 2007, vol. 18, pp. 439–447.

7. **Larionov Yu. V.** Otsenka diametra puchka REM po krivim videosignala ot trapetseidальной strukturi. 1. Modelnii eksperiment, *Poverkhnost*, 2016, no. 3, pp. 87–97 (in Russian).

8. **Gavrilenko V. P., Filippov M. N., Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A.** Measurement of linear sizes of relief elements in nanometer range using a scanning electron microscope, *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6648, pp. 66489T1-12.

9. **Larionov Yu. V.** Otsenka diametra puchka REM po krivim videosignala ot trapetseidальной strukturi. 2. Eksperiment, *Poverkhnost*, 2016, no. 12, pp. 96–108 (in Russian).

10. **Volk Ch. P., Gornev E. S., Novikov Yu. A., Plotnikov Yu. I., Rakov A. V.** Problemi izmereniya geometricheskikh kharakteristik elektronnoogo zonda rastrovogo elektronnoogo mikroskopa, *Trudi IOFAN*, 2006, vol. 62, pp. 77–120.

11. **Cresswell M. W., Allen R. A., Guthrie W. F.** et al. Comparison of SEM and HRTEM CD measurements extracted from test structures having features linewidth from 40 to 240 nm, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no. 1, pp. 100–109.

12. **Dixon R. G., Guthrie W. F., Cresswell M. W.** et al. Single crystal critical reference material (SCCDRM): Process optimization for the next generation of standards, *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6518, 651815, pp. 1–11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 661, 655.1

DOI: 10.17587/nmst.22.11-14

С. В. Редькин, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: sergeiredckin@yandex.ru,
Федеральное государственное автономное научное учреждение
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ

Поступила в редакцию 30.10.2019

Предложена упрощенная модель расчета скорости и времени протекания технологического процесса формирования кубического карбида кремния на кремнии в низкотемпературной плазме на основе механизма образования дефектов кристаллической решетки кремния — вакансий по Шоттки. Предложенная модель объясняет установленное в эксперименте утонение пластины, которое является неотъемлемым для формирования качественных слоев $3C-SiC$ на Si и не подверженных растрескиванию и отслоению. Выполнены численные оценки параметров технологического процесса при конкретных значениях входящих величин.

Ключевые слова: кубический карбид кремния, кремний, вакансии, поток, скорость, время технологического процесса, пластина

Введение

Экспериментально установлено, что в процессе формирования слоев кубического карбида кремния ($3C-SiC$) на кремнии (Si) исходные пластины Si утоняются, необходимо объяснить это явление. Попробуем описать это явление аналитически, то о чем было сказано в предыдущей статье очень схематично (МНСТ, 2019, № 12).

Теоретическое обоснование процессов

Поскольку все процессы мы проводили в плазме, то исходная пластина Si подвергается воздействию заряженных частиц, что приводит к генерации на ее поверхности дефектов. В зависимости от значения энергии активных частиц плазмы возникают дефекты, которые могут быть в последующем устранены или нет. Необходимо

отметить, что дефекты могут быть электрически активными — дополнительные уровни в запрещенной зоне [1–2] и дефекты положения атома в решетке — вакансии.

Появление в запрещенной зоне дополнительных уровней не может изменить толщину пластины Si , поэтому остановимся на вторых дефектах — дефектах кристаллической структуры — вакансиях.

Из физики твердого тела известно, что энергия связи атомов, являющихся ближайшими соседями в кристаллической решетке твердого тела, обычно составляет ~ 1 эВ [3]. Из того же источника следует, что есть два типа вакансий: вакансии по Шоттки и вакансии по Френкелю. Энергия образования вакансий по Шоттки равна $0,11...0,86$ эВ, а по Френкелю — $1,1...1,4$ эВ [4].

Если в твердом теле есть градиент концентрации вакансий, то их поток будет двигаться

сквозь твердое тело. Поэтому, если мы создаем этот градиент (обработка в плазме), то атомы Si, находящиеся внутри пластины, устремятся к ее поверхности, где протекают химические реакции с образованием летучих соединений, и таким образом удаляются из пластины, т. е. происходит утонение пластины. Так можно объяснить экспериментальный факт.

Поскольку на поверхности пластины атомы Si удаляются, то следует признать, что у нас "работает" механизм образования вакансий по Шоттки и их диффузия внутрь пластины (самодиффузия). Мы считаем, что у нас идеальный кристалл кремния и мы его обрабатываем в плазме целевым образом. В силу того что подвижность электронов в плазме выше, чем у ионов (ввиду значительной разницы в массе), то поверхность нашей пластины заряжается отрицательно. Возникает постоянное электрическое поле между пластиной и плазмой, поэтому диффузия вакансий (что эквивалентно диффузии атомов) ионов Si из внутренних слоев пластины будет определяться и градиентом концентрации, и электрическим полем, и тепловым полем.

Скорость взаимодействия будет определяться скоростью генерации дефектов на поверхности и их регенерацией за счет атомов и ионов, находящихся внутри кристалла.

Вероятность того, что узел решетки является вакантным, учитывается следующим образом:

$$p = \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

где E — энергия, необходимая для перемещения атома из узла кристаллической решетки внутри кристалла в узел на поверхность; k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Как известно, коэффициент диффузии определяется по формуле

$$D = va^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

где a — постоянная решетки; v — собственная частота колебаний атома в герцах. Эти частоты имеют значения порядка 10^{14} Гц.

Поток атомов к поверхности, определяемый градиентом концентрации, можно записать как

$$J_N = N\vartheta_1 = -D \text{grad} N, \quad (3)$$

или, учитывая (2),

$$J_N = -va^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \text{grad} N, \quad (4)$$

где $N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$ — плотность распределения атомов; N_0 — число атомов; ϑ_1 — средняя скорость перемещения атомов в поверхностном слое L , обусловленная градиентом концентрации.

Как видно из формулы (4), поток атомов зависит от температуры. Причем входящий в него коэффициент диффузии — это коэффициент амбиполярной диффузии ионов и электронов в возникающем поверхностном слое L ($L \approx 10^{-7} \dots 10^{-5}$ см [4]), который характеризуется высокой напряженностью электрического поля ε ($\varepsilon \approx 10^5 \dots 10^7$ В/см).

Это поле будет оказывать существенное влияние на процессы выхода атомов из объема кристалла, а также и на прохождение через слой L . Поток атомов, определяемый силовым электрическим полем, можно записать как

$$J_\varepsilon = N\vartheta_2 = N\mu\varepsilon, \quad (5)$$

где ϑ_2 — средняя скорость перемещения атомов, обусловленная напряженностью поля; μ — подвижность атомов в электрическом поле.

Так как в слое L все примеси ионизированы [4], то используя соотношение Эйнштейна, имеем

$$kT\mu = qD, \quad (6)$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура, К; D — коэффициент диффузии; q — заряд иона.

Зная заряд иона, можно найти подвижность μ :

$$\mu = \frac{qD}{kT},$$

учитывая (2), получаем

$$\mu = \frac{qva^2}{kT} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right). \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), будем иметь

$$J_\varepsilon = \frac{Nqva^2}{kT} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \varepsilon. \quad (8)$$

Таким образом, результирующий поток атомов будет определяться этими двумя потоками J_N и J_ε :

$$J = J_N + J_\varepsilon;$$

$$J = -va^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \text{grad} N + \frac{Nqva^2}{kT} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \varepsilon. \quad (9)$$

Зная потоки, можно определить скорости указанных процессов. Они соответственно равны:

$$|g_1| = \frac{J_N}{N} = \frac{va^2}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \text{grad}N; \quad (10)$$

$$|g_2| = \frac{J_\varepsilon}{N} = \frac{qva^2}{kT} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \varepsilon. \quad (11)$$

Теперь можно определить соответствующее время выхода атомов из слоя для каждого из процессов:

$$\tau_1 = \frac{L}{|g_1|}; \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{L}{|g_2|}. \quad (13)$$

Проведем численные оценки скоростей и времен указанных процессов при следующих значениях входящих величин:

$$E = 1 \text{ эВ}; \quad k = 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}; \quad L = 1 \cdot 10^{-7} \text{ см};$$

$$T = T_i = 4,5 \cdot 10^2 \text{ К}; \quad a = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см};$$

$$N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3} [4];$$

$$q = e_0; \quad v = 1 \cdot 10^{14} \text{ Гц}; \quad \varepsilon = 1 \cdot 10^5 \text{ В/см}.$$

Стандартная пластина Si имеет толщину около 400 мкм (у нас использовались пластины толщиной 375 мкм). Для удобства расчетов примем толщину, равную 400 мкм. Поскольку процессы проводились и двухсторонние, то целесообразно рассматривать выход атомов из максимальной глубины в 200 мкм. Процессы мы проводили как при нагревании (не более 800 °С), так и вообще без специального подогрева — только от плазмы и небольшого проникающего ВЧ или СВЧ поля. Поэтому для ориентировочных расчетов мы приняли $T = 4,5 \cdot 10^2 \text{ К}$, т. е. невысокую среднюю температуру процесса. Это позволяет нам оценить скорости и времена реально протекающих процессов, выявить преобладающие и в дальнейшем делать оценки параметров проведения технологических процессов по формированию слоев 3С — SiC требуемой толщины.

Как указывалось выше, все процессы образования 3С — SiC, удаление атомов Si в химических соединениях SiH_x , SiF_x происходят в поверхностном слое L . Условно можно подсчи-

тать число слоев h в нашей расчетной толщине ($b = 200 \text{ мкм}$). Оно будет равно

$$h = \frac{b}{L}. \quad (14)$$

В нашем случае $h = 2 \cdot 10^5$.

Прежде всего, подсчитаем скорость и время процесса в возникшем силовом электрическом поле ε в слое L , это уравнения (11) и (13). Мы получили, что $|g_2| = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$, а $\tau_2 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}$, тогда время t_2 нашего технологического процесса в силовом поле ε (выход атома из середины пластины) составит

$$t_2 = h\tau_2,$$

$$t_2 = 5,2 \cdot 10^3 \text{ с} = 86,6 \text{ мин} = 1,44 \text{ ч},$$

что хорошо согласуется с экспериментом. Конечно, для полной корректности необходимо еще добавить в расчеты и значение потенциального барьера, который приходится преодолевать атому при выходе из решетки, но это значительно усложнит расчеты.

Мы сделали нулевое приближение, пригодное для ориентировочных расчетов технологического процесса, а следующим шагом конечно должен быть еще и учет потенциального барьера.

Подсчитаем скорость и время процесса, определяемые градиентом концентрации атомов Si в слое L , это уравнения (10) и (12):

$$|g_1| = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см/с}, \quad \tau_1 = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

тогда время t_1 нашего технологического процесса, определяемого градиентом концентрации, составит:

$$t_1 = h\tau_1 = 1,32 \cdot 10^3 \text{ с} = 22 \text{ мин}.$$

Общее время технологического процесса, определяемое силовым электрическим полем и градиентом концентрации дефектов, будет равно:

$$t = t_1 + t_2 = 108,6 \text{ мин} = 1,81 \text{ ч},$$

что согласуется с экспериментом по двухсторонней обработке (полной модификацией Si пластин в 3С — SiC).

Для еще более грубой оценки можно принимать во внимание только время воздействия силового поля ε , поскольку оно составляет 86,6 мин, т. е. почти в 4 раза превышает время концентрационного механизма (22 мин).

Заключение

Поскольку в экспериментах по формированию слоев 3С — SiC на Si установлено утонение пластины Si, предложенная модель позволяет объяснить это явление и оценить некоторые его параметры, которые хорошо согласуются с общим процессом — формированием 3С — SiC и утонением Si. Таким образом, процесс утонения пластины может выступать как индикатор всего интегрированного процесса и его параметры (скорость и время) могут служить (в нулевом приближении) как параметры всего технологического процесса.

Для ориентировочного расчета времени технологического процесса для конкретной толщины 3С — SiC необходимо вместо 200 мкм подставить ее и выполнить приведенные выше расчеты.

Удаление атомов Si (в соединениях SiH_x и SiF_x) необходимо для согласования кристаллических

решеток 3С — SiC и Si (чтобы слои 3С — SiC не отслаивались). Таким образом, процесс утонения пластины Si является неотъемлемым процессом для формирования качественных слоев 3С — SiC на Si.

Список литературы

1. Ковешников С. В., Редькин С. В., Старков В. В., Юнкин В. А., Якимов Е. Б., Ярыкин Н. А. Генерация электрически активных дефектов при реактивно-ионном травлении кремния // Микроэлектроника. 1986. Т. 15, вып. 5. С. 462–463.
2. Ковешников С. В., Редькин С. В., Старков В. В., Юнкин В. А. Влияние ВЧ — электрического разряда на дефектообразование в кремнии // Микроэлектроника. 1988. Т. 17, вып. 1. С. 24–27.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 791 с.
4. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М.—Л.: Изд. АН СССР, 1957. 494 с.

S. V. Red'kin, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: sergeiredckin@yandex.ru,
V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Red'kin Sergey V., Ph. D., Leading Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: sergeiredckin@yandex.ru

A Simplified Model of Calculating the Parameters of Plasma Process Formation of Cubic Silicon Carbide on Silicon

Received on October 30, 2019
Accepted on November 12, 2019

A simplified model is proposed for calculating the speed and time of the technological process for the formation of cubic silicon carbide (3C — SiC) on silicon (Si) in a low-temperature plasma based on the Schottky vacancy formation mechanism of Si crystal lattice defects. The proposed model explains the experimentally established thinning of the plate, which is essential for the formation of high-quality 3C — SiC layers on Si without any cracking and delamination. Numerical estimates of the parameters of the technological process are carried out for specific values of the input quantities.

Keywords: cubic silicon carbide, silicon, vacancies, flow, speed, process time, wafer

For citation:

Red'kin S. V. A Simplified Model of Calculating the Parameters of Plasma Process Formation of Cubic Silicon Carbide on Silicon, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 11–14.

DOI: 10.17587/nmst.22.11-14

References

1. Koveshnikov S. V., Redkin S. V., Starkov V. V., Yunkin V. A., Yakimov E. B., Yarykin N. A. Generatsiya elektricheskii aktivnykh defektov pri reaktivno-ionnom travlenii kremniya, *Mikroelektronika*, 1986, vol. 15, no. 5, pp. 462–463 (in Russian).

2. Koveshnikov S. V., Redkin S. V., Yunkin V. A., Yakimov E. B., Yarykin N. A. Vliyaniye VCH — elektricheskogo razryada na defektoobrazovanie v kremnii, *Mikroelektronika*, 1988, vol. 17, no. 1, pp. 24–27 (in Russian).
3. Kittel C. Vvedenie v fiziku tverdogo tela. Moscow, Nauka, 1978, 791 p. (in Russian).
4. Ioffe A. F. Fizika poluprovodnikov. Moscow—Leningrad, Izd. AN SSSR, 1957, 494 p. (in Russian).

Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., R.Tikhonov@tcen.ru,
А. А. Черемисинов, канд. техн. наук, нач. лаб., **Д. В. Горелов**, мл. науч. сотр.,
Ю. В. Казаков, мл. науч. сотр.,
ГУ НПК "Технологический центр", Москва

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК СПЛАВА NiFe ИЗ ХЛОРИДНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА С НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ОСНОВНЫХ СОЛЕЙ

Поступила в редакцию 08.11.2019

Проведено исследование разбавленных хлоридных электролитов с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ для осаждения $Ni_{81}Fe_{19}$ с помощью спектрофотометрии и при электрохимическом осаждении. В слабых растворах повышается не только электролитическая диссоциация солей, но и содержание двухзарядных ионов железа по сравнению с однозарядными ионами. Подтверждается принцип влияния заряда ионов железа на состав пленок пермаллоя. Магнитные свойства пленок пермаллоя улучшаются при добавке аммиака в хлоридный электролит с низкой концентрацией основных солей. Электрохимическое осаждение пленок пермаллоя из хлоридного электролита с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ и концентрацией $Fe^{+2} = 0,004$ моль/л позволяет получать при комнатной температуре пленки $Ni_{81}Fe_{19}$ с составом, конгруэнтным составу электролита при учете большей скорости осаждения никеля и при использовании добавки аммиака.

Ключевые слова: пермаллой, электрохимическое осаждение, хлоридный электролит, заряд ионов

Введение

Электролитическое осаждение сплавов никеля и железа известно на протяжении многих лет [1–27]. Первоначально состав ванны для электролитического осаждения железоникелевых сплавов, в частности $Ni_{80}Fe_{20}$ или пермаллоя, состоял из простой смеси солей сульфата или хлорида никеля и железа. Меньшая скорость осаждения более благородного никеля по отношению к железу была установлена [1]. Этот эффект получил название аномального осаждения и объясняется исходя из концепции влияния гидроксида железа на осаждение никеля [2–10]. Эта концепция рассматривается во всех последующих работах. Для того чтобы обойти действие аномального эффекта предлагались разные электролиты [11–17], введение в электролит никеля большой концен-

трации [18], различные комплексообразующие добавки [19–24]. Электрохимическое осаждение проводилось также на вращающийся катод [25], на импульсном токе [26, 27], в магнитном поле [28, 29] и в ультразвуковом поле [30], в растворах на основе ионных жидкостей вместо воды [31–34]. Применяемые электролиты характеризуются широким диапазоном молярного отношения никеля и железа — от 50 до 0,1. Между составом электролита и осажденной пленки не было установлено однозначное соответствие.

Установление зависимости электрохимического осаждения сплава NiFe от заряда ионов железа при изменении температуры электролита [35] позволяет по-новому подойти к составлению электролита. Заряд ионов в электролите зависит не только от температуры, но также и от

концентрации железа. Уменьшение концентрации, как хорошо известно, приводит к усилению электролитической диссоциации солей [36]. Для выяснения природы явлений, происходящих в электролите с низкой концентрацией основных солей, проведено спектрофотометрическое исследование хлоридных электролитов и осаждение пленок сплава NiFe при комнатной температуре.

1. Спектрофотометрия растворов FeCl_3 и FeCl_2

Электролитическая диссоциация солей в электролитах для электрохимического осаждения пермаллоя сплава NiFe исследована в растворах $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Выбранные дозы соли растворяли в воде, а потом раствор постепенно разбавляли. На рис. 1 и 2 приведены спектры пропускания растворов в диапазоне длин волн света 315...1150 нм, полученные на спектрофотометре В-1100 в односантиметровых кюветах по методике, описанной в работе [37]. Зависимости пропускания на длинах волн 495 и 975 нм от концентрации приведены на рис. 3 и 4.

Свежеприготовленный раствор $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ имеет желтый цвет, быстро переходящий в желто-коричневый. Нагрев раствора до температуры более 70°C увеличивает поглощение света

за счет образования нерастворимого гидроксида железа. Выпадает желтоватая коллоидная взвесь. Добавление соляной кислоты исключает образование взвеси гидроксида при нагреве до 75°C .

Оптический спектр пропускания при комнатной температуре раствора представлен на рис. 1.

Добавка соляной кислоты расширяет пик поглощения при $\lambda = 335$ нм, поэтому можно считать, что этот пик связан с ионами хлора, тогда как пик поглощения при $\lambda = 975$ нм практически не изменяется и связан, видимо, с ионами железа. Согласно [36] при гидролизе FeCl_3 образуется гидроксид трехвалентного железа в виде дисперсной системы коллоидного раствора с размерами частиц $\text{Fe}(\text{OH})_3$ менее 500 нм, которые рассеивают свет по эффекту Тиндаля. Образование коллоидных частиц гидроксида уменьшает пропускание света в области спектра между пиками поглощения.

Цвет раствора $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — светло-желтый и очень прозрачный. Нагрев до 75°C увеличивает поглощение раствором FeCl_2 за счет гидролиза и образования взвеси нерастворимого коричневого гидроксида $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Добавление соляной кислоты исключает образование гидроксида при нагреве до 75°C . На рис. 2 представлен оптический спектр пропускания раствора при комнатной температуре.

Добавка соляной кислоты расширяет пик поглощения при $\lambda = 345$ нм, поэтому можно предположить, что этот пик связан с ионами хлора, а пик поглощения при $\lambda = 975$ нм связан с ионами железа. Пропускание света в области между пиками поглощения уменьшается со временем, так как гидролиз соли продолжается за счет выпадения железа в нерастворимом гидроксида и сдвига химической реакции гидролиза по принципу Ле-Шателье.

На рис. 3 представлен оптический спектр пропускания при комнатной температуре раствора $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ на длинах волн света при $\lambda = 495$ нм и при $\lambda = 975$ нм при изменении концентрации FeCl_3 от 0,0074 до 0,593 моль/л. Разбавление электролита приводит к увеличению пропускания света

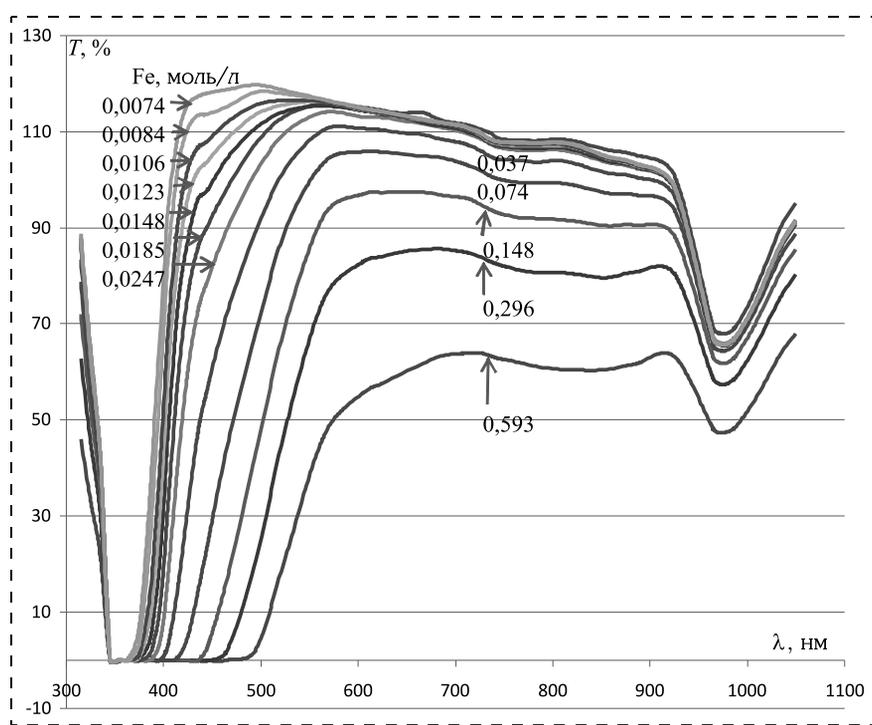


Рис. 1. Спектры пропускания раствора при изменении концентрации FeCl_3 от 0,593 до 0,0074 моль/л

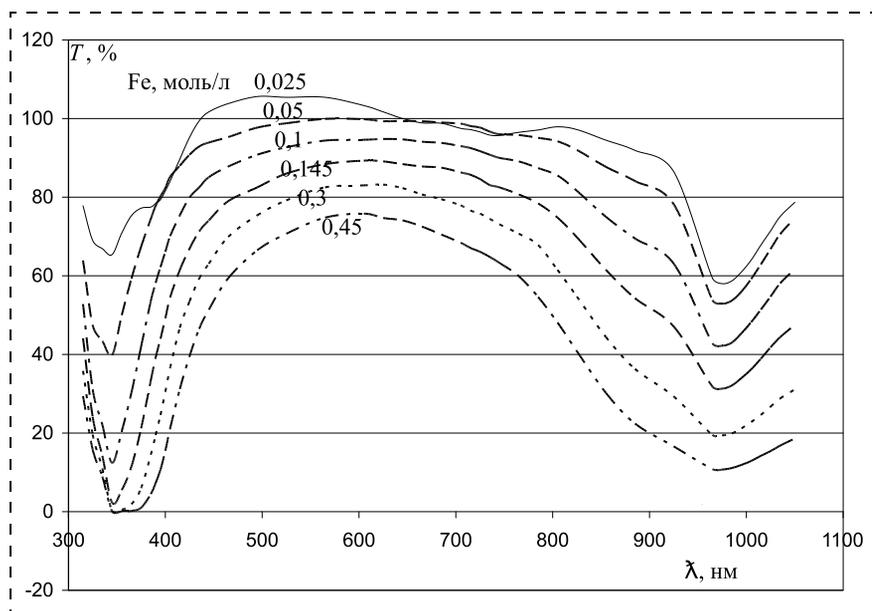


Рис. 2. Спектры пропускания раствора при изменении концентрации FeCl_2 от 0,45 до 0,025 моль/л

как в области пиков, так и между пиками. На длине волны 495 нм, связанной с ионами хлора, происходит значительный рост пропускания света. Начиная с концентрации FeCl_3 , равной 0,4 моля, наблюдается особенность в зависимости от спектра на длине волны 975 нм. Несмотря на значительное разбавление электролита, поглощение становится почти постоянным на этой длине волны, соответствующей ионам железа. Электролитическая диссоциация соли FeCl_3 приводит к образованию двухзарядного иона железа.

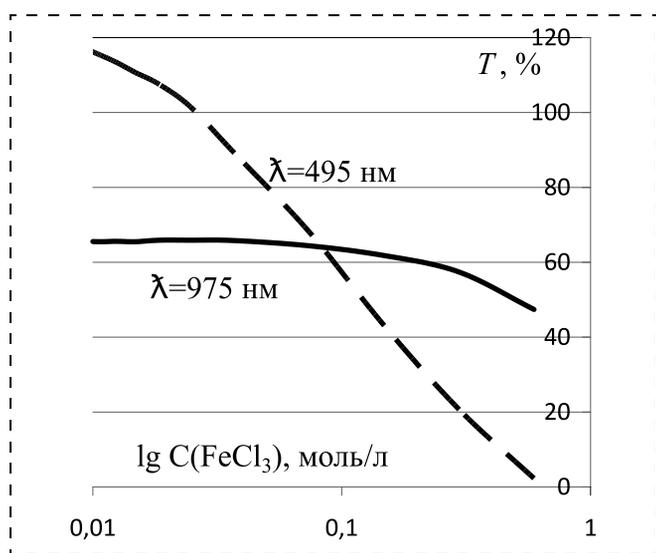


Рис. 3. Спектры пропускания раствора на длинах волн света 495 и 975 нм при изменении концентрации FeCl_3 от 0,0074 до 0,593 моль/л

На рис. 4 представлен оптический спектр пропускания при комнатной температуре раствора $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ на длинах волн света 495 и 975 нм при изменении концентрации FeCl_2 от 0,00156 до 0,45 моль/л. Разбавление электролита приводит к увеличению пропускания света. Начиная с концентрации FeCl_2 , равной 0,025 моль/л, наблюдается особенность в зависимости спектра на длине волны 975 нм. Разбавление электролита приводит к постоянному поглощению света на этой длине волны, соответствующей ионам железа. На длине волны 495 нм, связанной с ионами хлора, происходит значительный рост пропускания. Электролитическая

диссоциация соли FeCl_2 происходит с образованием двухзарядного иона железа. Зависимость при длине волны света 495 нм проходит значительно выше, чем для раствора FeCl_3 , так как связанный с хлором пик поглощения света гораздо интенсивнее в трихлористом железе, чем в растворе двуххлористого железа.

В слабых растворах электролита для осаждения сплава повышается не только электролитическая диссоциация солей, но также увеличивается содержание двухзарядных ионов по сравнению с однозарядными ионами.

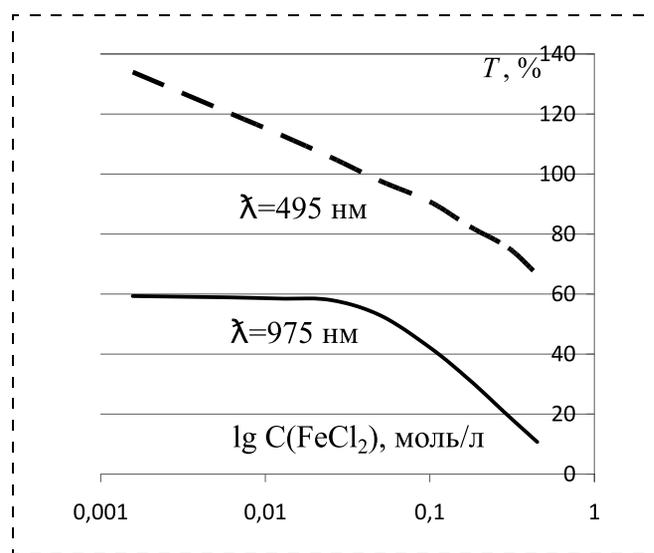


Рис. 4. Спектры пропускания раствора на длинах волн света 495 и 975 нм при концентрации FeCl_2 от 0,00156 до 0,45 моль/л

Ионы в этих растворах по-разному взаимодействуют, например, с борной кислотой. Взаимодействия раствора $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с борной кислотой не наблюдается и осадок за 14 дней не выделяется. Гидролиз FeCl_3 при комнатной температуре в присутствии борной кислоты не происходит, т. е. борная кислота не образует комплекс с ионами в растворе FeCl_3 . Вместе с тем после месяца хранения раствора FeCl_3 без борной кислоты на дне сосуда появился желто-коричневый осадок гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Значительный рост пропускания света происходит после выдержки в течение суток электролитов $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ с борной кислотой как без нагрева, так и с нагревом электролита. Происходит очистка растворов FeCl_2 от гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$ с помощью комплексообразователя борной кислоты и выпадение осадка, что явно отличает раствор FeCl_2 от раствора FeCl_3 .

2. Ионные равновесия при гидролизе FeCl_3 и FeCl_2

Результаты, полученные при спектрофотометрии электролитов, сопоставляются с ионными равновесиями в электролитах FeCl_3 , FeCl_2 , полученными по результатам термодинамических расчетов в работе [38].

На рис. 5 представлено распределение ионов железа в виде FeCl^{2+} и FeCl_2^+ в растворе FeCl_3 с концентрацией 1,0 моль/л в зависимости от концентрации HCl при 25 °С.

В растворе FeCl_3 преобладают двухзарядные ионы $(\text{Fe}^{3+}\text{Cl}^-)^{2+}$ по сравнению с однозарядны-

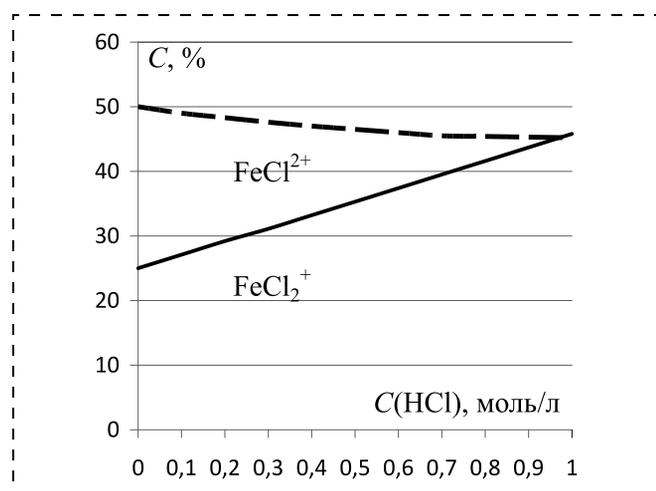


Рис. 5. Распределение ионов железа в виде FeCl^{2+} и FeCl_2^+ в растворе FeCl_3 с концентрацией 1,0 моль/л в зависимости от добавленной концентрации HCl при 25 °С

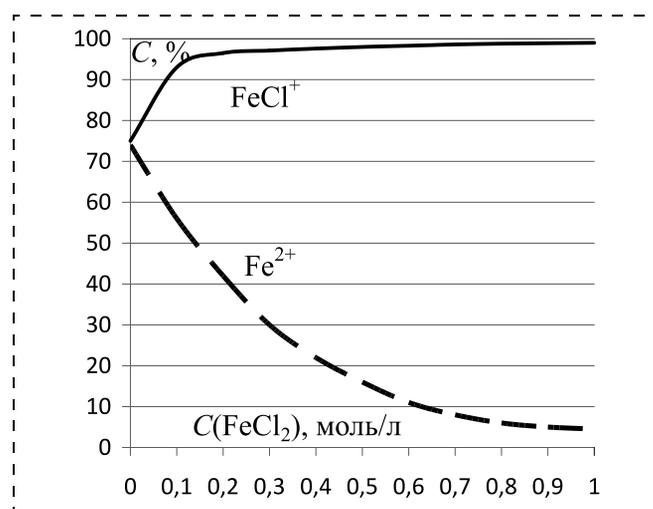


Рис. 6. Распределение ионов железа Fe^{2+} и хлорида железа $(\text{Fe}^{2+}\text{Cl}^-)^+$ в зависимости от добавленной концентрации FeCl_2 при 25 °С

ми ионами $(\text{Fe}^{3+}\text{Cl}_2^-)^+$. Все ионы содержат кроме железа хлор, а ионов только железа нет.

На рис. 6 представлено распределение ионов железа в виде Fe^{2+} и FeCl^+ в растворе FeCl_2 в зависимости от концентрации при 25 °С.

В растворе FeCl_2 с большой концентрацией содержание однозарядных ионов FeCl^+ преобладает над количеством двухзарядных ионов Fe^{2+} . За счет выбора концентрации FeCl_2 можно получить осаждение ионов железа Fe^{2+} , а не хлорида железа $(\text{Fe}^{2+}\text{Cl}^-)^+$, который создает в осаждаемой пленке примесь хлора и изменяет скорость электроосаждения из-за значения заряда.

3. Спектрофотометрия электролита для осаждения сплава NiFe

Проведено исследование спектров поглощения в 10-сантиметровых кюветках электролитов, имеющих отношение $\text{Ni/Fe} = 4,26$ при малом содержании NiCl_2 , равном 0,0064 моль/л, и FeCl_3 или FeCl_2 , равном 0,015 моль/л, и при разбавлении в 2, 4, 8 раз (рис. 7, 8).

В разбавленных хлоридных электролитах $\text{NiFe}(\text{III})$ происходит уменьшение поглощения света как в области $\lambda = 650 \dots 750$ нм, так и в пике при $\lambda = 975$ нм, хотя и не так сильно.

При выдержке один день до контроля спектра 2 возрастает поглощение света в области длин волн 400...500 нм, которое может быть связано с образованием, например, гидроксида железа.

В разбавленных хлоридных электролитах $\text{NiFe}(\text{II})$ происходит уменьшение поглощения света как в области длин волн 650...750 нм, так

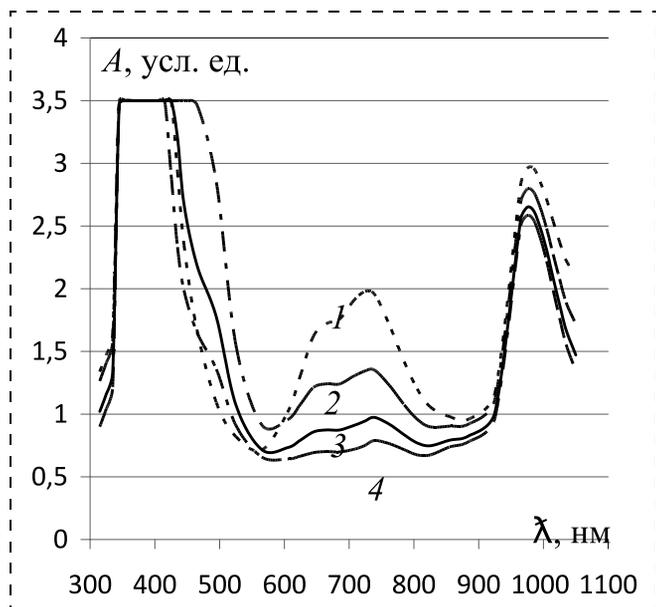


Рис. 7. Спектры поглощения хлоридного электролита с концентрацией (кривая 1) NiCl_2 , равной 0,064 моль/л, и FeCl_3 — 0,015 моль/л при последующем разбавлении раствора в 2 (кривая 2), 4 (кривая 3), 8 (кривая 4) раз

и в пике — 975 нм, хотя и не так сильно. При выдержке 3 дня до контроля спектра 3 возрастает поглощение света от первоначально измеренного спектра 3' в области длин волн 400...500 нм, которое может быть связано с образованием, например, гидроксида.

4. Электроосаждение пленок NiFe из электролита с малой концентрацией основных солей

В соответствии с разным содержанием ионов железа процесс осаждения из электролитов с FeCl_2 или FeCl_3 происходит по-разному. При плотности тока 4 мА/см² осаждение на молибденовую фольгу дало зависимости содержания железа в пленках от концентрации солей в электролите, представленное на рис. 9.

Исследование состава пленок проведено с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора *PhilipsXL 40*.

Из зависимости содержания железа в пленках пермаллоя от разбавления хлоридного электролита, представленной на рис. 9, следует, что пленки пермаллоя с составом $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ получаются при электрохимическом осаждении из простого хлоридного электролита с отношением $C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}} = 4,26$ и концентрациями Fe^{+3} — 0,002 моль/л, Fe^{+2} — 0,004 моль/л. Следовательно, при этих концентрациях хлоридов никеля и

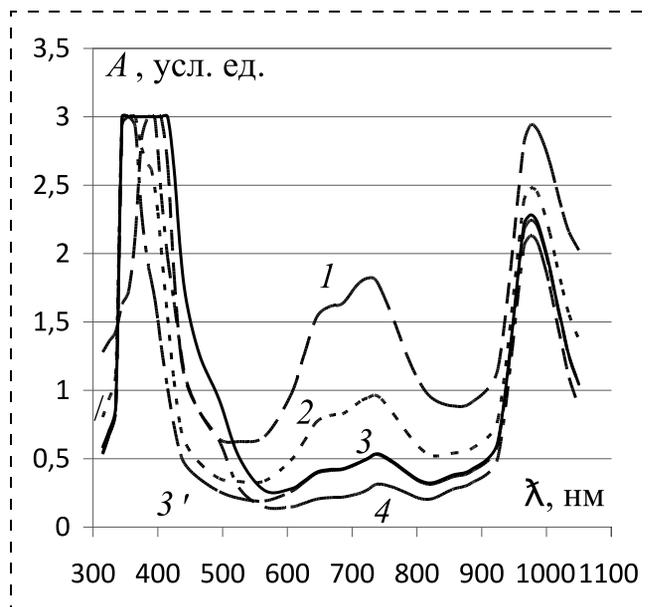


Рис. 8. Спектры поглощения хлоридного электролита с концентрацией (кривая 1) NiCl_2 , равной 0,064 моль/л, и FeCl_2 — 0,015 моль/л при последующем разбавлении раствора в 2 (кривая 2), 4 (кривые 3, 3'), 8 (кривая 4) раз

железа в электролите заряды ионов никеля и железа Ni^{2+} , $(\text{Fe}^{+3}\text{Cl}^-)^{2+}$, Fe^{+2} имеют при разряде на катоде одинаковое значение, равное двум, и позволяют получать при комнатной температуре пленки с составом, конгруэнтным составу электролита.

При разбавлении раствора солей NiCl_2 , FeCl_3 , FeCl_2 кислотность должна уменьшаться и показатель pH должен монотонно расти, как показано на рис. 10 в диапазоне изменения концентрации солей 0,015...0,25 моль/л.

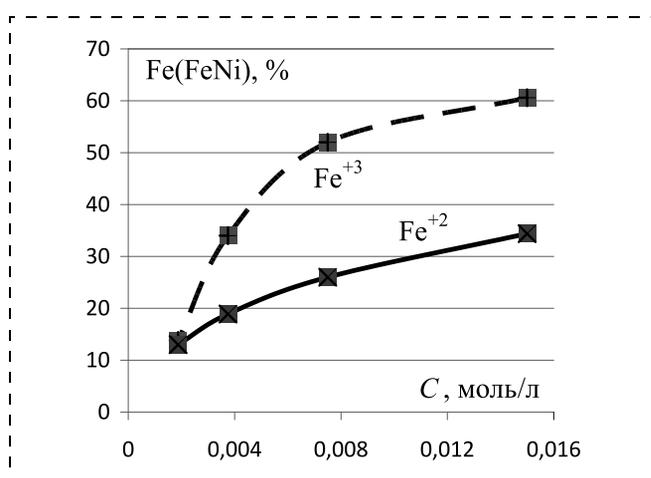


Рис. 9. Содержание железа в пленках сплава FeNi, электрохимически осажденных из хлоридного электролита с концентрацией NiCl_2 , равной 0,064 моль/л, FeCl_3 или FeCl_2 — 0,015 моль/л и при разбавлении в 2, 4 и 8 раз

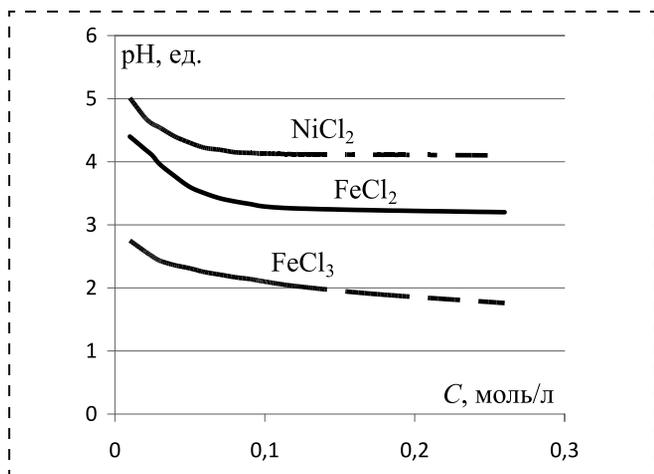


Рис. 10. Зависимость pH от концентрации растворов NiCl_2 , FeCl_3 , FeCl_2

Однако на зависимости pH электролита с соотношением $\text{Ni}/\text{Fe} = 4,26$ в диапазоне изменения концентрации солей FeCl_3 , FeCl_2 — $0,015 \dots 0,002$ моль/л на рис. 11 наблюдается не монотонная зависимость. При уменьшении концентрации солей кислотность электролита сначала растет, а потом падает и pH изменяется не монотонно. Изменение pH электролита соответствует переходу в электролите однозарядных ионов железа в двухзарядные ионы с последующим изменением, определяемым разбавлением.

В разбавленных простых хлоридных электролитах для осаждения сплава NiFe с отношением $C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}} = 4,26$ подтверждается принцип влияния заряда ионов железа на состав пленок пермаллоя.

5. Электрохимическое осаждение пленок пермаллоя из электролита с добавками, изменяющими pH

Спектрофотограммы поглощения хлоридного электролита с малой концентрацией солей NiCl_2 , равной $0,064$ моль/л, и FeCl_2 — $0,0037$ моль/л исследованы и представлены на рис. 12 с добавками соляной кислоты, едкого натра и нашатырного спирта. На длинах волн, характерных для никеля, равных 650 нм, 740 нм и для железа — 960 нм добавки

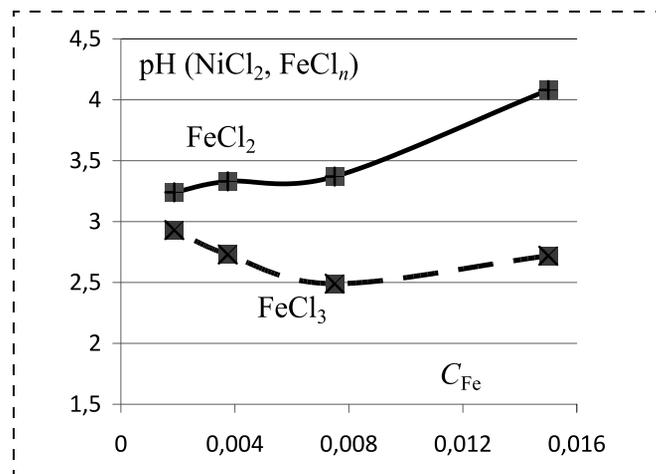


Рис. 11. pH хлоридного электролита с концентрацией NiCl_2 , равной $0,064$ моль/л, FeCl_3 или FeCl_2 — $0,015$ моль/л при разбавлении в 2, 4 и 8 раз

вносят небольшие изменения. Основные изменения спектра происходят в диапазоне длин волн $330 \dots 450$ нм, соответствующих диссоциации атомов хлора.

Проведенные исследования электроосаждения пленок пермаллоя на никелевой фольге в указанном составе электролита показали, что без добавок борной кислоты и сахарина осаждение идет крайне неравномерно и осадок черного цвета отслаивается. При добавке в хлоридный электролит с борной кислотой и сахарином со-

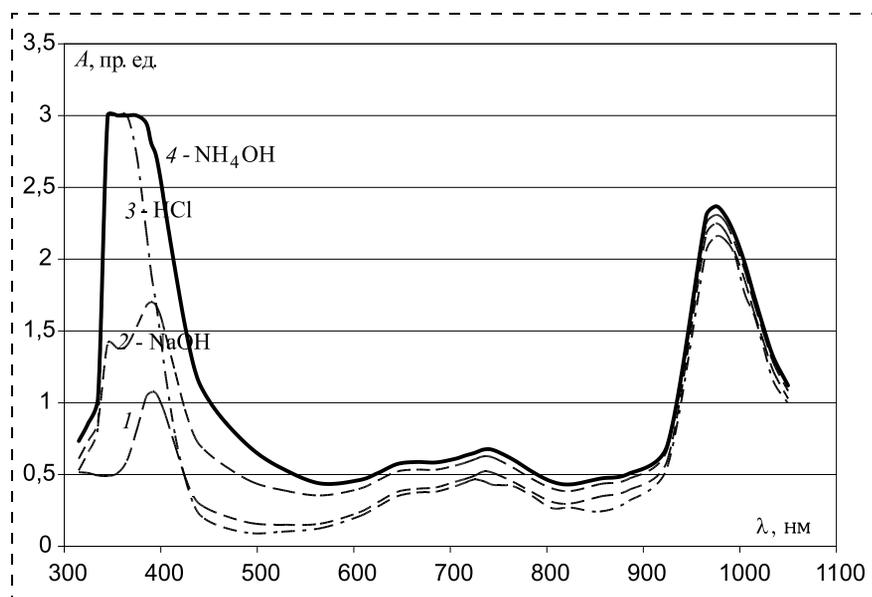


Рис. 12. Спектрограммы в диапазоне длин волн $315 \dots 1100$ нм хлоридного электролита с малой концентрацией солей, г/л:

1 — $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 3,8; $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,75; V_3O_5 — 25; сахарин — 3, pH = 4,02; 2 — то же, что 1, с добавкой NH_4OH $0,0047$ моль/л, pH = 3,75; 3 — то же, что 1, с добавкой HCl $0,005$ моль/л, pH = 2,02; 4 — то же, что 1, с добавкой NaOH $0,0047$ моль/л, pH = 6,08

ляной кислоты осаждения не происходит, так как травится подслоем и пленка не осаждается. Как показано в табл. 1, без добавки и с добавкой щелочи NaOH скорость осаждения небольшая. Добавка 2 мл/л 4 % NH₄OH обеспечивает получение пленок пермаллоя толщиной до 7,2 мкм с необходимым составом за 2 ч. Можно заключить, что найден состав хлоридного электролита с добавкой нашатырного спирта для осаждения пленок пермаллоя при комнатной температуре. Кроме электроосаждения в процессе участвуют химические добавки, изменяющие начальную фазу образования осадков.

Добавка в электролит соляной кислоты с концентрацией 2 мл/л приводит к образованию газовых пузырей на подложке во время проведения процесса. Добавка в электролит щелочи с концентрацией 2 мл/л 25 % NaOH исключает образование газовых пузырей на подложке. Добавка в электролит 2 мл/л нашатырного спирта 4 % NH₄OH исключает образование газовых пузырей на подложке. Процесс осаждения проходит

нормально со скоростью до 60 нм/мин. Электролит желтеет, мутнеет за 2 ч, но пленка осаждается, несмотря на наличие сначала мелких, а потом и крупных пузырей и образования пены из пузырей.

6. Электрохимическое осаждение пленок пермаллоя из электролита с переменным содержанием никеля

Проведено исследование зависимости скорости осаждения, содержания железа и магнитных свойств пленок пермаллоя при фиксированном содержании железа и переменном содержании никеля в свежеприготовленном хлоридном электролите на кремниевые подложки, металлизированные никелем (табл. 2). Для уменьшения образования гидроксида электролит готовили перед каждым процессом осаждения.

Анализ результатов, представленных на рис. 13, показывает, что при содержании гидрата хлорида никеля в электролите — 7,6 г и гидрата хлорида

Таблица 1

Параметры электрохимического осаждения пленок пермаллоя

№ образца	C _(FeCl₂) , г/л	Добавка	pH	T, °C	J, мА/см ²	V, мкм/мин	Fe, %
1	8,6	HCl	2,1	65	12	0,12	19,1
2	44	HCl	1,6	60	12	0,13	18,7
3	22	HCl	1,8	70	12	0,19	19,2
11	0,75	NH ₄ OH	6	21	4	0,06	17,4
12	0,75	—	4	21	4	0,03	35,6
13	0,75	NaOH	3,75	21	4	0,01	34,1

Таблица 2

Параметры пленок пермаллоя при электрохимическом осаждении из хлоридного электролита с малой концентрацией примесей при комнатной температуре и с добавками NH₃

№ образца	Состав Ni + NH ₃ на 2 л	pH	Ток, мА	Время, мин	Толщина, мкм	Скорость, нм/мин	V, нВб	V/h, нВб/мкм	H, Э	Fe, %
32	5,2 г	4,4	250	60	1,5	23	218	145	1,1	22
31	5,8 г	4,5	250	60	2,4	41	250	104	1,0	20,15
28	6,2 + 2 мл	5,8	250	60	2,6	43	247	95	0,5	20,04
30	6,4 г	4,3	250	60	2,3	38	274	119	1,8	18,7
27	6,6 + 2 мл	5,6	250	60	1,9	32	242	127	0,5	20,05
29	7,0 г	4,3	250	60	5,3	88	343	65	2,0	16
24	7,0 г	4,2	150	120	3,4	28	355	104	3,3	17,4
25	7,0 г	6,1	150	120	2,8	23	361	129	1,8	16,2
23	7,2 г	4,2	200	120	3	25	330	110	3	17,2
26	7,2 г	6,1	200	120	4,3	36	404	94	0,8	17,5
36	7,3 г	4,4	200	60	2,5	41	300	120	1,5	18,15
33	7,6 + 4 мл	5,0	200	60	3	50	282	94	2,6	15,7
42	7,6 + 2 мл	5,7	250	60	5	83	319	64	1,6	15,7
45	6,2 + 2 мл	6,44	250	60	0,3	5	190	633	0,2	20,5

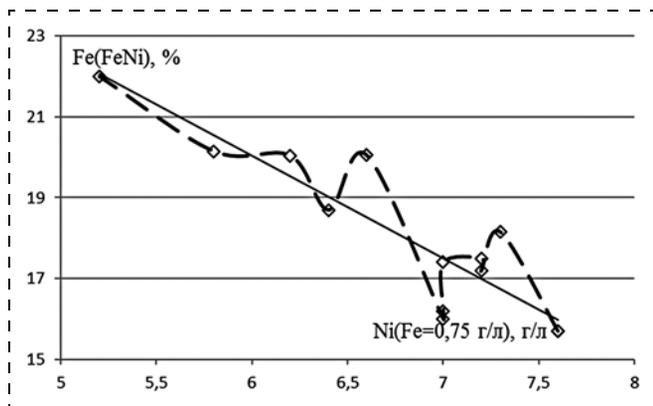


Рис. 13. Содержание железа в пленках сплава FeNi при электрохимическом осаждении из хлоридного электролита с концентрацией NiCl_2 , равной 0,048...0,064 моль/л, FeCl_2 — 0,015 моль/л

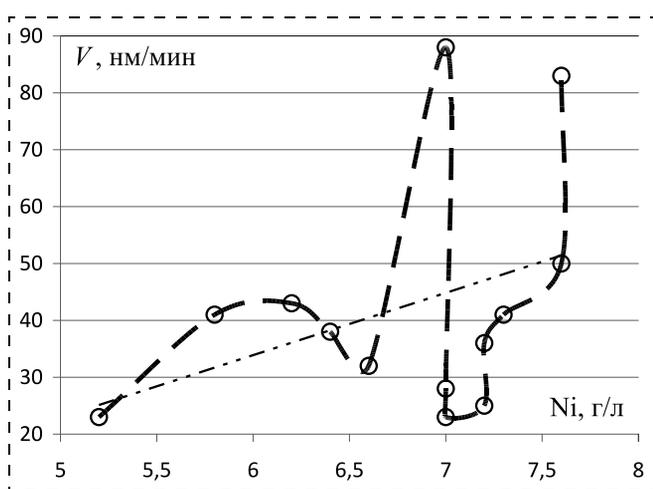


Рис. 14. Скорость электрохимического осаждения пленок сплава FeNi из хлоридного электролита с концентрацией NiCl_2 , равной 0,048...0,064 моль/л, FeCl_2 — 0,015 моль/л

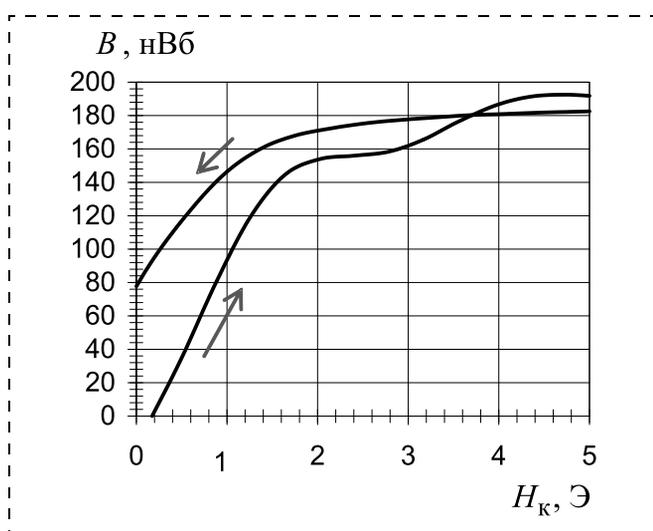


Рис. 15. Кривая намагничивания пленки пермаллоя на пластине № 45

железа — 1,5 г, соответствующему соотношению никеля и железа, равному 4,26, содержание железа в пленке будет менее 19 %. Происходит преимущественное осаждение никеля, в отличие от аномального осаждения.

Содержание никеля в электролите необходимо уменьшать, так как повышенная скорость осаждения никеля по сравнению с осаждением железа происходит вследствие большего значения электрохимического потенциала более благородного никеля. Содержание железа 19 % получается при снижении концентрации никеля в электролите на 16 %.

Скорость осаждения пленок пермаллоя из хлоридного электролита с малой концентрацией основных солей, согласно рис. 14, растет при увеличении содержания никеля в электролите.

Кривая намагничивания образца пленки № 45 из табл. 2 представлена на рис. 15. Пленка NiFe содержит 20,5 % Fe. Наблюдается улучшение магнитных свойств пленок пермаллоя при добавке аммиака в хлоридный электролит. Уменьшается коэрцитивная сила H_k до 0,2 Э и растет удельное намагничивание до 633 нВб/мкм.

7. Обсуждение результатов

Кажется почти невероятным, что исследователи в течение 60 лет проводили электроосаждение сплава Fe—Ni и получали преимущественное осаждение железа по отношению к никелю при всех составах электролита. Применяемые электролиты характеризуются широким диапазоном молярного отношения никеля и железа. Никто из исследователей не связал аномальность электроосаждения с главной особенностью ионов железа — существованием переменной валентности железа, двух и трех значений заряда ионов при гидролизе солей железа. Установленное в работах [39—44] конгруэнтное осаждение при учете заряда ионов в электролите позволяет получать воспроизводимое электрохимическое осаждение пермаллоя с преимущественным осаждением никеля.

Для сравнения, например, в работе [19] при соотношении концентраций никеля и железа в хлоридном электролите 1; 1,5; 2,1; 3,2 получены соотношения компонентов в пленке 0,11...0,5 при плотности тока 50...200 mA/cm^2 и сделан вывод, что аномальное соосаждение не позволяет получать пленки пермаллоя с составом $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$. Отрицательный результат получен вследствие несоответствия заданной большой плотности тока при

малой концентрации примесей никеля и железа в электролите в противоречии с законом Фарадея.

В недавно вышедшей книге [18] для осаждения магнитомягких сплавов Ni—Fe приводятся типичные составы растворов. Рекомендуемые концентрации солей никеля — 500 ммоль/л и железа — 10 ммоль/л отличаются в 50 раз и не соответствуют соотношению примесей в сплаве пермаллой Ni₈₁Fe₁₉, а поэтому не могут дать конгруэнтного осаждения сплава. Следует отметить необоснованность данной рекомендации.

Основные особенности явлений, происходящих в электролите с низкой концентрацией основных солей, следующие.

Электрохимическое осаждение пленок сплава NiFe из хлоридного электролита с низкой концентрацией основных солей при комнатной температуре дало преимущественное осаждение никеля, в отличие от аномального осаждения.

Спектрофотограммы поглощения хлоридного электролита с малой концентрацией солей NiCl₂ и FeCl₂ исследованы с добавками соляной кислоты, едкого натра и нашатырного спирта. Основные изменения спектра происходят в диапазоне волн, соответствующих диссоциации атомов хлора.

Зависимость рН электролита в диапазоне изменения концентрации солей FeCl₂, равной 0,015...0,002 моль/л, имеет немонотонный характер и соответствует изменению баланса ионов железа из однозарядных в двухзарядные.

Из зависимости содержания железа в пленках пермаллой от разбавления хлоридного электролита следует, что пленки пермаллой с составом Fe₁₉Ni₈₁ получают при электрохимическом осаждении из простого хлоридного электролита с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ и концентрациями Fe⁺² — 0,004 моль/л.

Добавка в хлоридный электролит с низкой концентрацией основных солей нашатырного спирта исключает образование газовых пузырей на подложке. В свежеприготовленном растворе процесс осаждения проходит нормально со скоростью до 60 нм/мин. Электролит изменяет цвет вследствие образования гидроксида, но пленка осаждается нормально. Кривая намагничивания показывает улучшение магнитных свойств пленок пермаллой: уменьшается коэрцитивная сила до 0,2 Э и растет удельное намагничивание до 633 нВб/мкм. Это может быть связано с действием азота.

В работе [45] показано, что пленки FeNiN, полученные магнетронным распылением мишени

Fe₂₀Ni₈₀ в среде азота, обладают высокими магнитомягкими свойствами. Инертный азот практически не реагирует с никелем и железом, однако возможно образование соединений Fe₄N, Fe₂N, имеющих магнитные варианты. Азот присутствует в пленках Fe₂₀Ni₈₀ в небольших количествах и создает на границах гранул барьеры для изменения доменов, что приводит к изменению магнитных свойств.

Заключение

Анализ слабых растворов электролита для осаждения сплава NiFe показал, что при разбавлении повышается не только электролитическая диссоциация солей, но также содержание двухзарядных ионов по сравнению с однозарядными ионами.

В разбавленных хлоридных электролитах для осаждения сплава NiFe с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ подтверждается принцип влияния заряда ионов железа на состав пленок пермаллой.

Электрохимическое осаждение пленок пермаллой из хлоридного электролита с отношением $C_{Ni}/C_{Fe} = 4,26$ и с концентрацией Fe⁺² — 0,004 моль/л позволяет получать при комнатной температуре пленки с составом, конгруэнтным составу электролита, и с отличными магнитными свойствами.

Многочисленные исследования электроосаждения сплава NiFe, проведенные ранее, не позволили получить конгруэнтный процесс электрохимического получения пленок сплава NiFe вследствие аномального соосаждения. Нормальное осаждение [39—44], учитывающее значение заряда ионов железа, позволяет получать воспроизводимые параметры пленок при конгруэнтном электрохимическом осаждении пленок пермаллой с составом, однозначно соответствующим заданному составу электролита.

Список литературы

1. **Коровин Н. В.** Катодные процессы при электроосаждении сплава никеля и железа // Журнал неорганической химии. 1957. № 2. С. 2259—2263.
2. **Wolf I. W.** Electrodeposition of Magnetic Materials // Journal of Applied Physics. 1962. Vol. 33, N. 3. P. 1152—1159.
3. **Brenner A.** Electrodeposition of Alloys. New York: Academic Press, 1963.
4. **Dahms H., Croll I. M.** The Anomalous Codeposition of Iron-Nickel Alloys // J. Electrochem. Soc. 1965. Vol. 112, is. 8. P. 771—775.
5. **Horkans J.** Effect of Plating Parameters on Electrodeposited NiFe // J. Electrochem. Soc.: Electrochemical Science and technology. 1981. Vol. 128, N. I. P. 45—51.

6. **Hessami S., Tobias C. W.** A Mathematical Model for Anomalous Codeposition of Nickel-Iron on a Rotating Disk Electrode // *J. Electrochem. Soc.* 1989. Vol. 136. P. 3611–3616.
7. **Matlosz M.** Competitive Adsorption Effects in the Electrodeposition of Iron-Nickel Alloys // *J. Electrochem. Soc.* 1993, Vol. 140, N. 8, pp. 2272–2279.
8. **Harris Th. M., Clair J. St.** Testing the Role of Metal Hydrolysis in the Anomalous Electrodeposition of Ni–Fe Alloys // *J. Electrochem. Soc.* 1996. Vol. 143, Is. 12. P. 3918–3922.
9. **Nakano H., Matsuno M., Oue S., Yano M., Kobayashi Sh., Fukushima H.** Mechanism of Anomalous Type Electrodeposition of Fe–Ni Alloys from Sulfate Solutions // *The Japan Institute of Metals, Materials Transactions.* 2004. Vol. 45, N. 11. P. 3130–3135.
10. **Dragos O., Chiriac H., Lupu N., Grigoras M., Tabacovic I.** Anomalous Codeposition of fcc NiFe Nanowires with 5–55 % Fe and Their Morphology, Crystal Structure and Magnetic Properties // *J. Electrochem. Soc.* 2016. Vol. 163 (3). P. 83–94.
11. **Venkatesetty H. V.** Electrodeposition of Thin Magnetic Permalloy Films // *J. Electrochem. Soc.* 1970. Vol. 117, N. 3. P. 403–407.
12. **Furukawa N., Hanabusa M., Hayashi T.** Electrodeposition of Ni–Fe alloys from sulfate, sulfate-chloride and chloride baths // *The American Electroplaters and Surface Finishers Society, Inc. (AESF) The Proceedings of the 79th AESF Annual Technical Conference, 1992.* P. 583–586.
13. **Andricacos P. C., Romankiw L. T.** Magnetically Soft Materials: Their Properties and Electrochemistry // *Advances in Electrochemical Science and Engineering.* Editors: H. Gerischer, Ch. W. Tobias. 1994. 331 p.
14. **Thommes A., Stark W., Bacher W.** Die galvanische Abscheidung von Eisen-Nickel in LIGA-Mikrostrukturen // *Institut für Mikrostrukturtechnik, 1995.* 95 p.
15. **Spada E. R., de Oliveira L. S., da Rocha A. S., Pasa A. A., Zangari G., Sartorelli M. L.** Thin Films of Fe_xNi_{1-x} Electroplated on Silicon (100) // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004.* N. 272–276. P. E891–E892.
16. **Bento F. R., Mascaro L. H.** Electrocrystallisation of Fe–Ni alloys from chloride electrolytes // *Surface and Coatings Technology.* 2006. Vol. 201, Is. 3–4. P. 1752–1756.
17. **Abdel-Karim R., Reda Y., Muhammed M., El-Raghy S., Shoeib M., Ahmed H.** Electrodeposition and Characterization of Nanocrystalline Ni–Fe Alloys // *Journal of Nanomaterials.* 2011. Vol. 2011, Article ID519274, 8 p.
18. **Гамбург Ю. Д., Зангари Дж.** Теория и практика электроосаждения металлов. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2015. 438 с. **Gamburg Yu. D., Zangari G.** Theory and Practice of Metal Electrodeposition. New York: Springer, 2011.
19. **Afshar A., Dolati A. G., Ghorbani M.** Electrochemical characterization of the Ni–Fe alloy electrodeposition from chloride-citrate-glycolic acid solutions // *Materials Chemistry and Physics.* 2002. Vol. 77. P. 352–358. **Горбани М., Долати А. Г., Афшар А.** Электроосаждение сплавов Ni–Fe в присутствии комплексообразователей // *Электрохимия.* 2002. Т. 38. С. 1299.
20. **Chin-Ming Chu.** The Effect of Complexing Agents on the Electrodeposition of Fe–Ni Powders // *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.* 2003. Vol. 34, N. 6. P. 689–695.
21. **Moniruzzaman M., Shorowordi K. M., Ashrafal A., and Taufique M. F. N.** Fe–Ni alloy electrodeposition from simple and complex type sulfate electrolytes containing Ni/Fe ratio of 1 and 12 // *Journal of Mechanical Engineering, The Institution of Engineers, Bangladesh.* 2014. Vol. 44 (1). P. 50–56.
22. **Tabakovic I., Gong J., Riemer S., Kautzky M.** Influence of Surface Roughness and Current Efficiency on n Gradients of Thin NiFe Films Obtained by Electrodeposition // *J. Electrochem. Soc.* 2015. Vol. 162 (3). P. 102–108.
23. **Torabinejad V., Aliofkhaezrai M., Assareh S., Allahyarzadeh M. H., and Rouhaghdam S.** Electrodeposition of Ni–Fe alloys, composites, and nano coatings — A review // *Journal of Alloys and Compounds.* 2017. Vol. 691. P. 841–859.
24. **Kashiwa Yu., Nagano N., Takasu T., Kobayashi Sh., Fukuda K., Nakano Hi.** Effects of Electrolyte Composition and Additives on the Formation of Invar Fe–Ni Alloys with Low Thermal Expansion Electrodeposited from Sulfate Bath // *The Iron and Steel Institute of Japan, J-STAGE home Tetsu-to-Hagane.* 2018. Vol. 104 (10).
25. **Leith S. D., Ramli Sh., Schwartz D. T.** Characterization of Ni_xFe_{1-x} ($0.1 < x < 0.95$) Electrodeposition from a Family of Sulfamate-Chloride Electrolytes // *Journal of the Electrochemical Society.* 1999. Vol. 146. P. 1431.
26. **Smistrup K., Tang P. T., Møller P.** Pulse Reversal Permalloy Plating Process for MEMS Applications // *The Electrochemical Society ECS Transactions.* 2007. Vol. 25. P. 179–189.
27. **Cao Y., Wei G. Y., Ge H. L., Meng X. F.** Study on preparation of NiFe films by galvanostatic electrodeposition // *Surface Engineering.* 2014. Vol. 30 (2). P. 97–101.
28. **Fricoteaux P., Rousse C.** Influence of substrate, pH and magnetic field onto composition and current efficiency of electrodeposited Ni–Fe alloys // *Journal of Electroanalytical Chemistry.* 2008. Vol. 612. N. 1. P. 9–14.
29. **Bialostocka A., Klekotka U., Kalska-Szostko B.** Modulation of iron–nickel layers composition by an external magnetic field // *Chemical Engineering Communications,* Published online: 22 Oct 2018.
30. **Deepthi K. A., Balachandran R., Ong B. H., Tan K. B., Wong H. Y., Yow H. K., Srimala S.** Physical and electrical characteristics of NiFe thin films using ultrasonic assisted pulse electrodeposition // *Applied Surface Science.* 2016. Vol. 360 (1). P. 519–524.
31. **Yoo B. Y., Hernandez S. C., Park D. Y., Myung N. V.** Electrodeposition of FeCoNi thin films for magnetic-MEMS devices // *Electrochim. Acta.* 2006. Vol. 51, N. 28. P. 6346–6352.
32. **Nai-Chang Lo, Pei-Chen Chung, Wan-Jung Chuang, Sodio C. N. Hsu, I-Wen Sun, Po-Yu Chenb.** Voltammetric Study and Electrodeposition of Ni(II)/Fe(II) in the Ionic Liquid 1-Butyl-1-Methylpyrrolidinium Dicyanamide // *Journal of The Electrochemical Society.* 2016. Vol. 163 (2). P. D9–D16.
33. **Yanai T., Eguchia K., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H.** Investigation of coercivity for electroplated Fe–Ni thick films // *AIP Advances.* 2018. Vol. 8 (5). P. 056123.
34. **Cesulius H., Tsytaru N., Podlaha E. J., Li D., Sort J.** Electrodeposition of Iron-Group Alloys into Nanostructured Oxide Membranes: Synthetic Challenges and Properties // *Current Nanoscience.* 2019. Vol. 15 (1). P. 84–99.
35. **Тихонов Р. Д., Поломошнов С. А., Черемисинов А. А., Горелов Д. В.** Пленочные концентраторы магнитного поля на основе пермаллоя // *Нано- и микросистемная техника.* 2019. Т. 21, № 8. С. 477–488.

36. **Коровин Н. В.** Общая химия. М.: Высшая школа, 1998. 559 с.

37. **Методы** оптической спектроскопии: методическое пособие под ред. И. И. Кулаковой, О. А. Федоровой, А. В. Хорошутина. М.: Изд-во МГУ, 2015. 117 с.

38. **Man-Seung Lee.** Use of the Bromley Equation for the Analysis of Ionic Equilibria in Mixed Ferric and Ferrous Chloride Solutions at 25 °C // *Metallurgical and materials transactions B*. 2006. Vol. 37B. P. 173–179.

39. **Тихонов Р. Д.** Электроосаждение сплава NiFe для производства интегральных микросхем // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2015. № 4. С. 13–19.

40. **Tikhonov R. D.** Normal Electrochemical Deposition of NiFe Films // *Advances in Research*. 2017. Vol. 11 (2). P. 1–10.

41. **Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А. Генералов С. С., Горелов Д. В., Поломошнов С. А., Казаков Ю. В.** Получение концентраторов магнитного поля с помощью

электрохимического осаждения пермаллоя // *Нано- и микросистемная техника*. 2015. № 3. С. 51–57.

42. **Тихонов Р. Д.** Патент РФ № 2623536 на изобретение "Способ электрохимического локального осаждения пленок пермаллоя Ni₈₁Fe₁₉ для интегральных микросистем", 27.06.2017.

43. **Tikhonov R.** Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy. Lambert Academic Publishing, 2019. 193 с.

44. **Tikhonov R. D.** Magnetic properties of permalloy films deposited electrochemically by the Tikhonov method // *British Open Journal of Chemical Sciences*, October 2018. Vol. 2, N. 2. P. 1–10, Available online at <http://borpub.com/Journals.php>.

45. **Zhu Z., Wei J., Feng H., Du J., Liu Q., Wang J.** Influence of substrate temperature on static and dynamic magnetic properties of FeNiN films // *Journal of Physics D Applied Physics*. 2017. Vol. 50 (4). P. 045002.

R. D. Tikhonov, Ph. D., Professor, Senior Researcher, R.Tikhonov@tcen.ru,
A. A. Cheremisinov, Ph. D., Head of Department, **D. V. Gorelov**, Junior Researcher,
Iu. V. Kasakov, Junior Researcher,
SMC "Technological Centre" MIET, e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru

Corresponding author:

Tikhonov Robert D., Ph. D., Professor, Senior Researcher, Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru

Electrochemical Deposition of NiFe Alloy Films of Chloride Electrolyte Containing Low Concentration of Basic Salts

Received on November 08, 2019

Accepted on November 18, 2019

The study of diluted chloride electrolytes with attitude Ni/Fe = 4.26 to Ni₈₁Fe₁₉ using spectrophotometry and in electrochemical deposition. Weak solutions increases not only the dissociation of salts, but also the content of the two charging of iron ions as compared to one with ions. Reaffirms the principle of charging of iron ions influence on composition of permalloy films. Magnetic properties of permalloy films improved by addition of ammonia chloride electrolyte containing low concentration of basic salts. Electrochemical deposition of permalloy films from chloride electrolyte with attitude $S_{Ni}/S_{Fe} = 4.26$ and the concentration of $Fe^{+2} = 0.004$ mol/l at room temperature allows you to retrieve the film Ni₈₁Fe₁₉ the composition of the electrolyte composition congruent registered more deposition rate of nickel and ammonia when using supplements.

Keywords: permalloy, electrochemical deposition, chloride electrolyte, the charge of ions

For citation:

Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V., Kasakov Iu. V., Electrochemical Deposition of NiFe Alloy Films of Chloride Electrolyte Containing Low Concentration of Basic Salts, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 15–27.

DOI: 10.17587/nmst.22.15-27

References

1. **Korovin N. V.** Katodnye processy pri elektroosazhdenii сплава nikelya i zheleza, *Zhurnal neorganicheskoy himii*, 1957, no. 2, pp. 2259–2263 (in Russian).

2. **Wolf I. W.** Electrodeposition of Magnetic Materials, *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1152–1159.

3. **Brenner A.** Electrodeposition of Alloys, Academic Press, New York, 1963.

4. **Dahms H., Croll I. M.** The Anomalous Codeposition of Iron-Nickel Alloys, *J. Electrochem. Soc.*, 1965, vol. 112, is. 8, pp. 771–775.

5. **Horkans J.** Effect of Plating Parameters on Electrodeposited NiFe, *J. Electrochem. Soc.: Electrochemical Science and technology*, 1981, vol. 128, no. I, pp. 45–51.

6. **Hessami S., Tobias C. W.**, A Mathematical Model for Anomalous Codeposition of Nickel-Iron on a Rotating Disk Electrode, *J. Electrochem. Soc.* 1989, vol. 136, pp. 3611–3616.
7. **Matlosz M.** Competitive Adsorption Effects in the Electrodeposition of Iron-Nickel Alloys, *J. Electrochem. Soc.*, 1993, vol. 140, no. 8, pp. 2272–2279.
8. **Harris Th. M., Clair J. St.** Testing the Role of Metal Hydrolysis in the Anomalous Electrodeposition of Ni–Fe Alloys, *J. Electrochem. Soc.* 1996, vol. 143, no. 12, pp. 3918–3922.
9. **Nakano H., Matsuno M., Oue S., Yano M., Kobayashi Sh., Fukushima H.** Mechanism of Anomalous Type Electrodeposition of Fe–Ni Alloys from Sulfate Solutions, *The Japan Institute of Metals, Materials Transactions*, 2004, vol. 45, no. 11, pp. 3130–3135.
10. **Dragos O., Chiriac H., Lupu N., Grigoras M., Tabacovic I.** Anomalous Codeposition of fcc NiFe Nanowires with 5–55 % Fe and Their Morphology, Crystal Structure and Magnetic Properties, *J. Electrochem. Soc.* 2016, vol. 163, no. 3, pp. 83–94.
11. **Venkatesetty H. V.** Electrodeposition of Thin Magnetic Permalloy Films, *J. Electrochem. Soc.*, 1970, vol. 117, no. 3, pp. 403–407.
12. **Furukawa N., Hanabusa M., Hayashi T.** Electrodeposition of Ni–Fe alloys from sulfate, sulfate-chloride and chloride baths, *The American Electroplaters and Surface Finishers Society, Inc. (AESF), The Proceedings of the 79th AESF Annual Technical Conference*, 1992, pp. 583–586.
13. **Andricacos P. C., Romankiw L. T.** Magnetically Soft Materials: Their Properties and Electrochemistry, *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, eds H. Gerischer, Ch. W. Tobias, 1994. 331 p.
14. **Thommes A., Stark W., Bacher W.** Die galvanische Abscheidung von Eisen-Nickel in LIGA-Mikrostrukturen, Institut für Mikrostrukturtechnik, 1995, 95 p.
15. **Spada E. R., de Oliveira L. S., da Rocha A. S., Pasa A. A., Zangari G., Sartorelli M. L.** Thin Films of Fe_xNi_{1-x} Electroplated on Silicon (100), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, no. 272–276, pp. E891–E892.
16. **Bento F. R., Mascaro L. H.** Electrocrystallisation of Fe–Ni alloys from chloride electrolytes, *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, no. 3–4, pp. 1752–1756.
17. **Abdel-Karim R., Reda Y., Muhammed M., El-Raghy S., Shoeib M., Ahmed H.** Electrodeposition and Characterization of Nanocrystalline Ni–Fe Alloys, *Journal of Nanomaterials*, 2011, vol. 2011, Article ID519274, 8 p.
18. **Gamburg Yu. D., Zangari Dzh.** Teoriya i praktika elektrosazhdeniya metallov, Moscow, Binom, Laboratoriya znanij, 2015. 438 p. (in Russian).
19. **Afshar A., Dolati A. G., Ghorbani M.** Electrochemical characterization of the Ni–Fe alloy electrodeposition from chloride-citrate-glycolic acid solutions, *Materials Chemistry and Physics*, 2002, vol. 77, pp. 352–358.
20. **Chin-Ming Chu.** The Effect of Complexing Agents on the Electrodeposition of Fe–Ni Powders, *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.*, 2003, vol. 34, no. 6, pp. 689–695.
21. **Moniruzzaman M., Shorowordi K. M., Ashrafu A., Taufique M. F. N.** Fe–Ni alloy electrodeposition from simple and complex type sulfate electrolytes containing Ni/Fe ratio of 1 and 12, *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, no. 44 (1), pp. 50–56.
22. **Tabakovic I., Gong J., Riemer S., Kautzky M.** Influence of Surface Roughness and Current Efficiency on n Gradients of Thin NiFe Films Obtained by Electrodeposition, *J. Electrochem. Soc.*, 2015, no. 162 (3), pp. 102–108.
23. **Torabinejad V., Aliofkhaezrai M., Assareh S., Allahyarzadeh M. H., Rouhaghdam S.** Electrodeposition of Ni–Fe alloys, composites, and nano coatings — A review, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, no. 691, pp. 841–859.
24. **Kashiwa Yu., Nagano N., Takasu T., Kobayashi Sh., Fukuda K., Nakano Hi.** Effects of Electrolyte Composition and Additives on the Formation of Invar Fe–Ni Alloys with Low Thermal Expansion Electrodeposited from Sulfate Bath, *The Iron and Steel Institute of Japan, J-STAGE home Tetsu-to-Hagane*, 2018, no. 104 (10).
25. **Leith S. D., Ramli Sh., Schwartz D. T.** Characterization of Ni_xFe_{1-x} ($0.1 < x < 0.95$) Electrodeposition from a Family of Sulfamate-Chloride Electrolytes, *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, vol. 146, 1431 p.
26. **Smistrup K., Tang P. T., Møller P.** Pulse Reversal Permalloy Plating Process for MEMS Applications, *The Electrochemical Society ECS Transactions*, 2007, no. 25, pp. 179–189.
27. **Cao Y., Wei G. Y., Ge H. L., Meng X. F.** Study on preparation of NiFe films by galvanostatic electrodeposition, *Surface Engineering*, 2014, no. 30 (2), pp. 97–101.
28. **Fricoteaux P., Rousse C.** Influence of substrate, pH and magnetic field onto composition and current efficiency of electrodeposited Ni–Fe alloys, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2008, vol. 612, no. 1, pp. 9–14.
29. **Bialostocka A., Klekotka U., Kalska-Szostko B.** Modulation of iron–nickel layers composition by an external magnetic field, *Chemical Engineering Communications*, Published online: 22 Oct 2018.
30. **Deepthi K. A., Balachandran R., Ong B. H., Tan K. B., Wong H. Y., Yow H. K., Srimala S.** Physical and electrical characteristics of NiFe thin films using ultrasonic assisted pulse electrodeposition, *Applied Surface Science*, 2016, no. 360 (1), pp. 519–524.
31. **Yoo B. Y., Hernandez S. C., Park D. Y., Myung N. V.** Electrodeposition of FeCoNi thin films for magnetic-MEMS devices, *Electrochim. Acta*, 2006, vol. 51, no. 28, pp. 6346–6352.
32. **Nai-Chang Lo, Pei-Chen Chung, Wan-Jung Chuang, Sodio C. N. Hsu, I-Wen Sun, and Po-Yu Chenb,** Voltammetric Study and Electrodeposition of Ni(II)/Fe(II) in the Ionic Liquid 1-Butyl-1-Methylpyrrolidinium Dicyanamide, *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, no. 163 (2), pp. D9–D16.
33. **Yanai T., Eguchia K., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H.** Investigation of coercivity for electroplated Fe–Ni thick films, *AIP Advances*, 2018, no. 8 (5), 056123 p.
34. **Cesiulis H., Tsytaru N., Podlaha E. J., Li D., Sort J.** Electrodeposition of Iron-Group Alloys into Nanostructured Oxide Membranes: Synthetic Challenges and Properties, *Current Nanoscience*, 2019, no. 15 (1), pp. 84–99.
35. **Tikhonov R. D., Polomoshnov S. A., Cheremisinov A. A., Gorelov D. V.** Plenochnye koncentratyornyye magnitnogo polya na osnove permalloya, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 8. pp. 477–488 (in Russian).
36. **Korovin N. V.** Obshchaya himiya. Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 559 p. (in Russian).
37. **Kulakova I. I., Fyodorova O. A., Horoshutin A. V.** Metody opticheskoy spektroskopii, metodicheskoe posobie. Moscow, MGU, 2015, 117 p. (in Russian).
38. **Man-Seung Lee.** Use of the Bromley Equation for the Analysis of Ionic Equilibria in Mixed Ferric and Ferrous Chloride Solutions at 25 °C, *Metallurgical and materials transactions B*, 2006, vol. 37B, pp. 173–179.

39. **Tikhonov R. D.** Elektroosazhdenie splava NiFe dlya proizvodstva integral'nyh mikroskhem, *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*, 2015, no. 4, pp. 13–19 (in Russian).

40. **Tikhonov R. D.** Normal Electrochemical Deposition of NiFe Films, *Advances in Research*, 2017, no. 11 (2), pp. 1–10.

41. **Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A., Generalov S. S., Gorelov D. V., Polomoshnov S. A., Kazakov Yu. V.** Poluchenie konzentratoren magnitnogo polya s pomoshch'yu elektrohimicheskogo osazhdeniya permalloya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 51–57 (in Russian).

42. **Tikhonov R. D.** Patent RF № 2623536 na izobretenie "Sposob elektrohimicheskogo lokal'nogo osazhdeniya plenok

permalloya $Ni_{81}Fe_{19}$ dlya integral'nyh mikrosistem", 27.06.2017 (in Russian).

43. **Tikhonov R.** Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy. Lambert Academic Publishing, 2019. 193 p.

44. **Tikhonov R. D.** Magnetic properties of permalloy films deposited electrochemically by the Tikhonov method, *British Open Journal of Chemical Sciences*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, available at <http://borpub.com/Journals.php>.

45. **Zhu Z., Wei J., Feng H., Du J., Liu Q., Wang J.** Influence of substrate temperature on static and dynamic magnetic properties of FeNiN films, *Journal of Physics D Applied Physics*, 2017, vol. 50 (4), 045002 p.

УДК 539.121.6

DOI: 10.17587/nmst.22.27-34

В. М. Егоренков, аспирант МИРЭА, e-mail: yegorenkov.valeriy@gmail.com, Российский технологический университет МИРЭА, Москва,

Н. В. Прудников, д-р техн. наук, проф., e-mail: mzairan@ipiran.ru,

ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЕВ ИЗОТОПА ^{241}Am ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Поступила в редакцию 19.10.2019

Проведены исследования по оптимизации состава и параметров слоя альфа-активного вещества ^{241}Am для создания источников тока на основе ядерной энергии. Обоснован состав альфа-активного слоя, исследованы неравномерность толщины слоев и энергетические спектры альфа-частиц изотопа ^{241}Am . Проведена оценка предельной поверхностной активности слоев.

Ключевые слова: ^{241}Am , МДМ-структура $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{NiCr}$, α -спектрометр, энергетический спектр альфа-частиц, глицерин, азотно-кислый раствор, вязкость, активность слоев

Введение

В настоящее время в качестве основного источника тока чаще всего используют ионно-литиевые перезаряжаемые батареи, т. е. химические элементы [1]. При соблюдении радиационной безопасности в устройствах, применяемых в специальных или экстремальных условиях, можно использовать источники ядерной энергии. Источники такого типа наиболее долговечны и не требуют устройств восполнения энергии [2].

В качестве преобразователя ядерной энергии в электрическую, разработан опытный образец — планарная МДМ-структура $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{NiCr}$ [3]. В качестве источника первичных заряженных частиц использовали изотоп ^{241}Am высокой степени радионуклидной чистоты. Для дальнейшей

оптимизации состава и параметров слоя альфа-активного вещества проведены исследования, представленные в данной работе.

Поиск оптимального состава слоев

Энергетические характеристики α -частиц, образующихся при распаде изотопа ^{241}Am , приведены в табл. 1.

В качестве средства измерений применяли полупроводниковый α -спектрометр "SOLOIST" с кремниевым детектором BU-012-25-100 разрешением 12 кэВ.

Слой ^{241}Am наносили в виде азотнокислых растворов на подготовленные в соответствии с РД 95 10392—2005 подложки (мишени) из нержавеющей стали марки 12X18H10T (диаметр

Период полураспада и энергетические характеристики α -частиц ^{241}Am

$T_{1/2}$, лет	Основные линии в порядке убывания интенсивности (E_α — энергия α -частиц, P — доля α -распада)							
	E_α , кэВ	P , %	E_α , кэВ	P , %	E_α , кэВ	P , %	E_α , кэВ	P , %
432,2	5485,6	84,5	5442,8	13,0	5388,23	1,6	5544,5	0,34

32 мм, толщина 0,2 мм, высота ~1,5 мм) и высушивали под термолампой, не допуская кипения [4].

Известно, что при высыхании растворов солей с низкой вязкостью по периметру занимаемой области образуется краевая кромка, а внутренняя поверхность характеризуется сетчатостью вследствие неравномерности испарения растворителя. Пример, иллюстрирующий указанное явление, представлен на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Одним из методов повышения однородности толщины наносимого слоя может являться введение в состав раствора испаряемого компонента, имеющего большую вязкость. В качестве подобного компонента может быть использован глицерин, вязкость которого в сравнении с вязкостью воды и растворов нитратов приведена в табл. 2.

Цели исследования:

- поиск состава раствора, позволяющего получить наиболее однородный активный слой;
- определение граничной толщины активного слоя, по достижению которой дальнейшее ее увеличение не будет приводить к росту ЭДС.

Измерение высоких активностей на α -спектрометрической аппаратуре представляет непростою задачу ввиду ограниченных возможностей изменения (увеличения) расстояния "источник—детектор", 100 %-ной регистрации всех α -частиц, попавших в детектор, высокой вероятности загрязнить детектор при таком количестве радиоактивного вещества в открытом виде в измерительной камере. В общем случае, в методиках выполнения измерений, обычно не рекомендуют помещать в измерительную камеру α -источники с активностью выше 10 000 Бк. Поэтому в целях адаптации аппаратуры к измерению высоких активностей была проведена следующая работа:

- установлен детектор с наименьшей из всех детекторов данного класса площадью чувствительной области (25 мм²);

- изготовлен дырочный коллиматор, снижающий мощность потока α -частиц к детектору в 28 раз.

Следует также отметить, что спектрометрический тракт используемой установки (α -спектрометр "SOLOIST") обладает хорошей устойчивостью к высоким нагрузкам. Практика показала, что измерение даже при 15 % "мертвого времени" не приводило к заметному искажению формы пиков.

В целях изучения возможности нанесения слоев оптимальной для получения ЭДС толщины, исследования поверхностной неоднородности при использовании разных составов раствора и возможного влияния материала подложки были приготовлены 10 образцов. Характеристики образцов и их активности приведены в табл. 3.

Анализ спектров показывает, что использование азотнокислого раствора америция приводит к увеличению выраженности низкоэнергетических "хвостов" пиков. Исключение составляет образец № 6, у которого неплохие характеристики формы спектра могут быть объяснены растеканием капли раствора по подложке и получением активного слоя с меньшей толщиной на единицу площади. Наличие низкоэнергетических "хвостов" свидетельствует о присутствии градиента толщин активного слоя.

Таблица 2

Динамические коэффициенты вязкости глицерина, воды, азотной кислоты и некоторых водных растворов нитратов

Растворенное вещество	Концентрация, %	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с		
		20 °С	60 °С	100 °С
Глицерин	100	1480	102	13
	50	6,05	2	0,73
Вода	100	1,0	0,469	0,284
Азотная кислота	100	0,8	0,5	0,35
	50	1,88	0,9	0,53
NaNO ₃	10	1,07	0,54	—
	30	1,33	0,79	—
KNO ₃	10	0,98	0,49	—
	20	0,98	0,51	—

Исходные характеристики образцов и полученные активности

№ образца	Растворитель	Материал подложки	Активность, Бк
1	Азотнокислый раствор	Коррозионно-стойкая сталь	$1,27 \cdot 10^6$
2	Азотнокислый раствор + глицерин	Коррозионно-стойкая сталь	$1,22 \cdot 10^6$
3	Азотнокислый раствор	Коррозионно-стойкая сталь	$9,92 \cdot 10^6$
4	Азотнокислый раствор + глицерин	Алюминий	$1,22 \cdot 10^6$
5	Азотнокислый раствор	Алюминий	$1,36 \cdot 10^6$
6	Азотнокислый раствор	Коррозионно-стойкая сталь	$2,29 \cdot 10^6$
7	Азотнокислый раствор + глицерин	Коррозионно-стойкая сталь	$4,84 \cdot 10^6$
8	Азотнокислый раствор	Коррозионно-стойкая сталь	$4,78 \cdot 10^7$
9	Азотнокислый раствор	Коррозионно-стойкая сталь	$6,92 \cdot 10^7$
10	Азотнокислый раствор + глицерин	Алюминий	$6,98 \cdot 10^6$
11–12	Азотнокислый раствор + глицерин	Коррозионно-стойкая сталь	$2,0 \cdot 10^9$ (расчетное значение)

Иная картина наблюдается для спектров образцов, приготовленных при использовании раствора с добавлением глицерина. Слабая выраженность низкоэнергетических хвостов и большая ширина на полувысоте пиков свидетельствуют о получении равномерного слоя увеличенной толщины. Увеличение толщины слоя может быть вызвано присутствием "тяжелых" органических фракций в глицерине. Следует отметить, что их присутствие улучшает связь слоя с подложкой, предотвращая возможное осыпание и загрязнение окружающего пространства как при анализе образцов, так и при монтаже экспериментального источника электрического тока. Поверхность слоя становится как бы "лаковой". Технологичность использования подложек с такими слоями повышается.

Потери энергии α -частиц в слое становятся заметны, начиная с образца № 3, активность слоя составляет $A = 9,92 \cdot 10^6$ Бк на пробу, поверхностная активность $A_s = A/S = 9,92 \cdot 10^6/19,6 = 5,05 \cdot 10^5$ Бк/мм².

Оценивая зависимость формы пиков от нанесенной активности, необходимо отметить, что в данной серии, даже для образца № 9 ($A = 6,92 \cdot 10^7$ Бк на пробу), полного поглощения α -частиц в слое не произошло, и резерв по наращиванию поверхностной активности был оценен не ниже десятикратного.

Для проверки этого предположения были приготовлены две параллельные пробы (образцы) № 11, 12, расчетная активность которых составила $2,0 \cdot 10^9$ Бк. Уже на стадии кристаллизации солей для образцов данной активности было заметно формирование толстого лепешкообраз-

ного слоя. При дальнейшей сушке поверхность слоя начала растрескиваться, формируя не связанные мелкие чешуйки на поверхности. Таким образом, был достигнут предел по возможности связывания активного вещества для данного состава.

При сравнении спектров, полученных от образцов с различающимся материалом подложки, влияния данного фактора на форму спектра не обнаружено. Таким образом, можно констатировать, что материал подложки не оказывает существенного влияния на качество слоя.

Контроль неоднородности толщины слоя нитрата америция

Неоднородность толщины α -излучающего слоя исследовали, применив специально изготовленный для этих целей угловой щелевой коллиматор со значением угла щели 15°. Радиус (длина щели) коллиматора мог быть изменен в зависимости от размеров и формы пятна активного слоя в пределах от 0 до 16 мм.

Для сравнительного анализа неоднородности толщины активного слоя были задействованы образцы № 7 (²⁴¹Am в глицерине) и № 8 (²⁴¹Am азотнокислый). В целях проверки отсутствия накопления активности в краевой кромке при использовании глицерина сканирование поверхности активного слоя было проведено с захватом края пятна на нескольких секторах. Сканирование поверхности образца на основе азотнокислого америция проведено во внутренних областях, без захвата краевой кромки. Результаты определений приведены в табл. 4 и 5 и графически представлены на рис. 2 и 3.

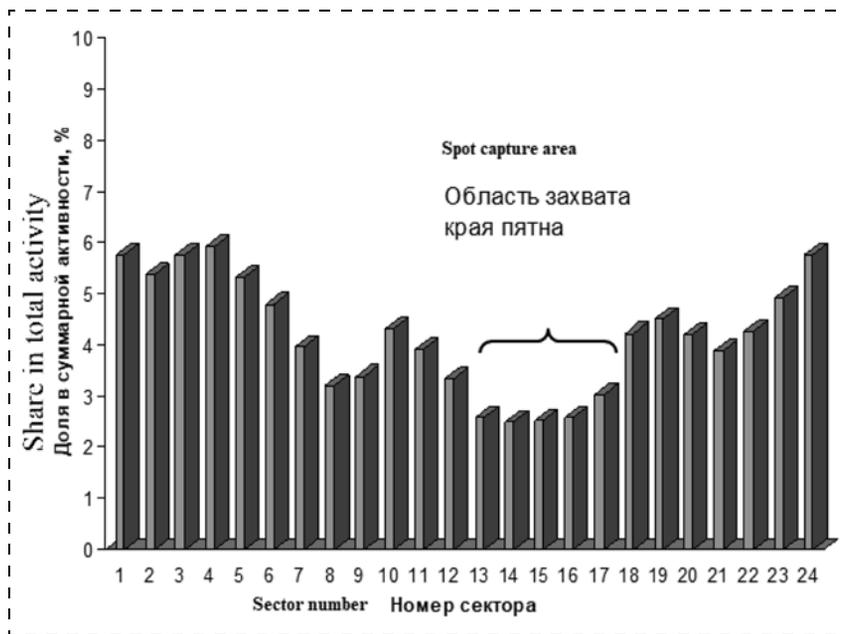


Рис. 2. Гистограмма распределения активности по секторам для образца № 7 (^{241}Am в глицерине). Измерения через 15° , щелевой коллиматор радиусом 3 мм

Как следует из полученных результатов по образцу № 7, в области захвата края пятна наблюдается снижение активности по соответствующим секторам. Данный факт свидетельствует об отсутствии значимых накоплений активности в краевой кромке, а следовательно, слабой выраженности явления кромкообразования как по периметру активного слоя, так и во внутренних его областях. Этот вывод подтверждает и сравнительный анализ гистограмм распределения активности по секторам для америция азотнокислого и "америция в глицерине". Гистограмма распределения активности по секторам для образца № 7 (см. рис. 2) характеризуется плавным изменением.

Таблица 4

Образец № 7 (^{241}Am в глицерине). Измерения через 15° щелевым коллиматором радиусом 3 мм. Время каждого измерения 120 с

№ сектора	Площадь пика, имп.	Доля в суммарной активности, %
1	15 033	5,762
2	14 017	5,372
3	15 024	5,758
4	15 447	5,921
5	13 887	5,322
6	12 519	4,798
7	10 338	3,962
8	8342	3,197
9	8828	3,384
10	11 256	4,314
11	10 206	3,912
12	8707	3,337
13*	6738	2,583
14*	6492	2,488
15*	6562	2,515
16*	6757	2,590
17*	7910	3,032
18	11 024	4,225
19	11 741	4,500
20	10 976	4,207
21	10 139	3,886
22	11 132	4,267
23	12 820	4,914
24	15 013	5,754
Σ	260 908	100

Таблица 5

Образец № 8 (^{241}Am азотнокислый). Измерения через 15° , щелевой коллиматор радиусом 3 мм. Время каждого измерения 120 с

№ сектора	Площадь пика, имп.	Доля в суммарной активности, %
1	22 693	0,664
2	19 739	0,577
3	18 512	0,541
4	17 150	0,501
5	17 866	0,522
6	33 604	0,983
7	65 982	1,929
8	78 707	2,301
9	81 871	2,394
10	116 722	3,413
11	164 652	4,814
12	206 060	6,025
13	267 802	7,831
14	244 789	7,158
15	229 552	6,712
16	217 811	6,369
17	231 387	6,766
18	258 546	7,560
19	294 549	8,613
20	314 046	9,183
21	230 463	6,739
22	166 534	4,870
23	85 432	2,498
24	35 454	1,037
Σ	3 419 922	100

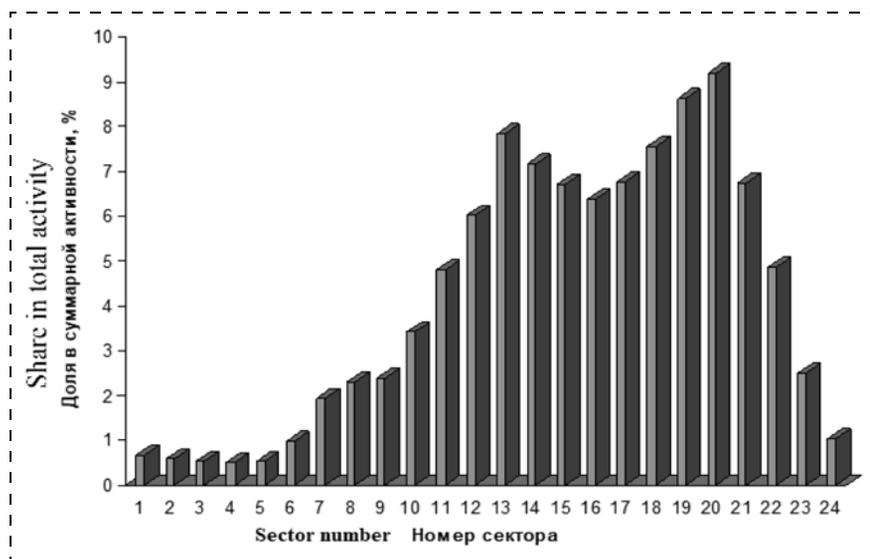


Рис. 3. Гистограмма распределения активности по секторам для образца № 8 (^{241}Am азотнокислый). Измерения через 15° , щелевой коллиматор радиусом 3 мм

Различие между максимальным и минимальным значениями активности (исключая область захвата поверхности без активного слоя) относительно невелико и соответствует двукратному.

Совершенно другая картина наблюдается при анализе гистограммы образца № 8 (см. рис. 3). Различия активностей по секторам значительны и достигают 18 между максимальным и минимальным значениями. Анализ структуры

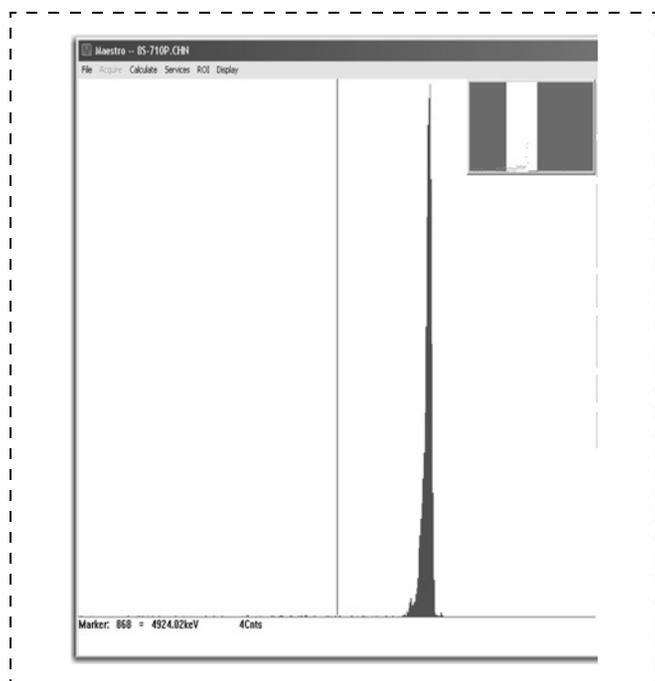


Рис. 4. Спектр 8-го сектора (наименьшая активность по гистограмме) углового распределения образца № 8 (^{241}Am в глицерине)

спектров по секторам показывает, что области с низкой активностью характеризуются более тонким слоем. В некоторых случаях даже начинает проявляться тонкая структура α -спектров (рис. 4). Это свидетельствует об отсутствии в данных областях значительных наслоений во внутренних кромках. Сектора с высокой активностью характеризуются значительным размытием спектра и ростом низкоэнергетических хвостов пиков (рис. 5). Таким образом, активный слой, приготовленный на основе азотнокислого раствора, имеет существенно бóльшую неоднородность по сравнению со слоем, приготовленным на основе

того же раствора, но с добавлением глицерина [5].

Оценка предельной активности америция-241 на единицу площади

Для оценки предельной активности на единицу площади был использован образец № 4, который имеет компактное круглое пятно активно-

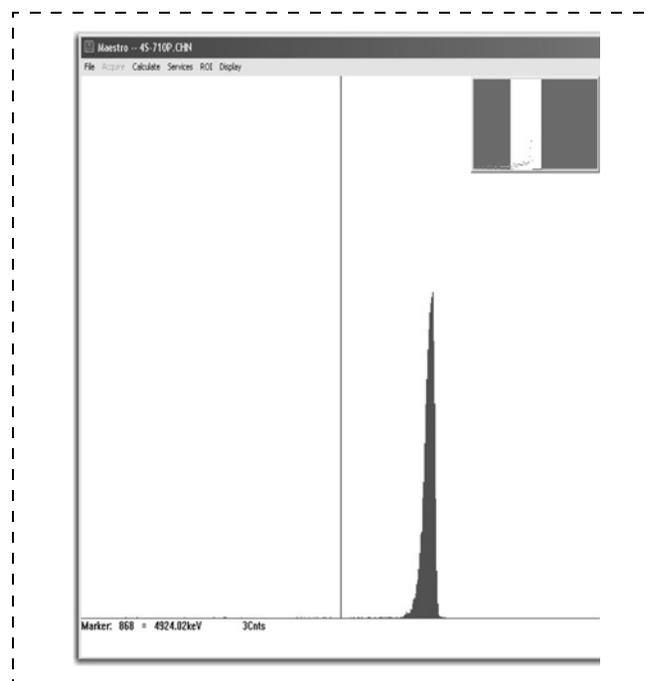


Рис. 5. Спектр 4-го сектора (наибольшая активность по гистограмме) углового распределения образца № 8 (^{241}Am в глицерине)

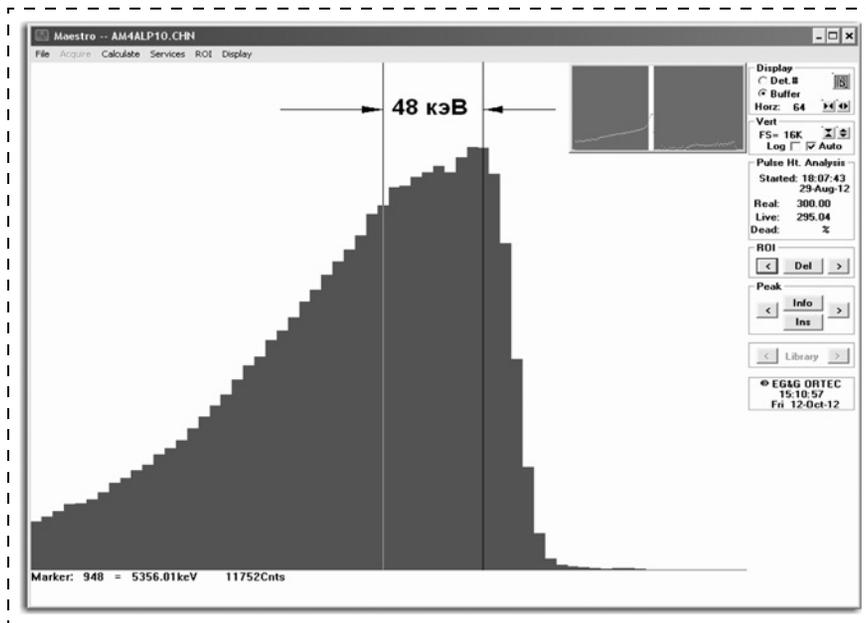


Рис. 6. Спектр образца № 4 в энергетической области главного пика ^{241}Am

го слоя диаметром ~ 5 мм. Спектр данного образца характеризуется наличием плоской вершины у главного пика, что связано с прохождением α -частицами слоя, толщина которого достаточна для реализации данного эффекта. В случае "бесконечно толстого" для прохождения α -частиц слоя плоская вершина, постепенно спадая, простирается до начальных энергий спектра. Наклон плоской вершины в сторону низких энергий происходит вследствие того, что значение удельной ионизации зависит от расстояния, пройденного α -частицей, и постоянной величиной не является.

Спектр образца № 4 в увеличенном масштабе в энергетической области главного пика представлен на рис. 6.

Нижняя граница плоской вершины пика характеризует среднюю минимальную толщину слоя, а дальнейший низкоэнергетический хвост связан с неравномерностью по толщине.

Активность образца составляет $1,22 \cdot 10^6$ Бк. Площадь пятна активного слоя $\sim 19,6$ мм². Отсюда поверхностная активность ^{241}Am для данного слоя составляет $1,22 \cdot 10^6 / 19,6 = 6,22 \cdot 10^4$ Бк/мм².

Энергетическая ширина плоской вершины для рассматриваемого образца составляет ~ 48 кэВ. Средневзвешенная энергия α -частиц ^{241}Am составляет $\sim 5478,6$ кэВ. Отсюда, для реализации эффекта полного поглощения α -частиц в нижней части активного слоя необходимо, чтобы этот слой имел толщину, в $5478,6/48 = 114$ раз

превышающую толщину слоя образца № 4. Следовательно, поверхностная активность слоя насыщения будет составлять $6,22 \cdot 10^4 \times 114 = 7,1 \cdot 10^6$ Бк/мм². То есть, если увеличивать активность образца № 4 без увеличения площади пятна активного слоя, то для слоя насыщения данный образец будет иметь активность $\sim 1,4 \cdot 10^8$ Бк. Данная цифра вероятно несколько занижена, так как с увеличением количества нитрата америция в массе осадка, его доля как компонента будет расти.

Установлено, что слои нитрата америция, приготовленные на основе азотнокислого раствора, имеют существенно большую неоднородность по сравнению со слоем, приготовленным на основе того же раствора, но с добавлением глицерина [6].

Заключение

Проведенные исследования позволили оптимизировать состав и параметры слоя α -активного вещества ^{241}Am для создания источников тока на основе ядерной энергии. Обоснован состав α -активного слоя (азотнокислый раствор нитрата америция с добавлением глицерина), исследованы неравномерность толщины слоев и энергетические спектры α -частиц изотопа ^{241}Am . Предельная поверхностная активность слоя оценена в 7 МБк/мм².

Список литературы

1. Егоренков В. М., Прудников Н. В., Кузнецов В. В. и др. Перспективные направления исследований в области оптики и квантовой электроники // Материалы Всероссийской научной конференции "Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки)". 2018. С. 250–252.
2. Егоренков В. М., Суворов И. С., Присянюк В. В. и др. К вопросу об автономных гибридных источниках питания на основе суперконденсаторов для работы в экстремальных условиях // Материалы 12-й Всероссийской научной конференции "Технологии и материалы для экстремальных условий". 2017. С. 67–73.
3. Чернов В. А., Палагушкин А. Н., Прудников Н. В. и др. Изготовление и исследование свойств наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую с использованием эмиссии вторичных

электронов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 2—9.

4. **Егоренков В. М., Прудников Н. В., Каравашкина Н. П.** и др. Лазерная нанокристаллизация материалов для получения тонкопленочных и объемных изделий // Материалы 10-й Всероссийской научной конференции "Технологии и материалы для экстремальных условий". 2015. С. 71—76.

5. **Чернов В. А., Степанов В. А., Прудников Н. В.** и др. Оптимизация состава и размеров источников тока, ос-

нованных на прямом преобразовании ядерной энергии в электрическую с использованием эмиссии вторичных электронов // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 57—64.

6. **Егоренков В. М., Прудников Н. В., Чернов В. А.** Миниатюрные наноструктурированные источники тока на основе прямого преобразования ядерной энергии // Нано- и микросистемная техника". 2018. Том 20, № 10. С. 606—610.

V. M. Egorenkov, Graduate Student, e-mail: yegorenkov.valeriy@gmail.com, Russian Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation,
N. V. Prudnikov, Dc. S., Professor, e-mail: mzairan@ipiran.ru, FSBIS Interdepartmental center of analytical research in the field of physics, chemistry and biology of the Presidency Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author:

Egorenkov Valerii M., Graduate Student, Russian Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: yegorenkov.valeriy@gmail.com

Study and Optimization of ^{241}Am Isotope Layers for Creation of Sources of Electric Current Based on Nuclear Energy

Received on October 19, 2019
Accepted on November 01, 2019

Studies related to optimizing the composition and parameters of the layer of ^{241}Am alpha-active substance intended for creation of sources of electric current based on nuclear energy.

A test sample — planar MDM-structure $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{NiCr}$ — was developed as a converter of nuclear energy into electrical energy. The isotope ^{241}Am with high degree of radionuclide purity was used as a source of primary charged particles.

Layers of ^{241}Am in the form of nitrate solutions were applied on prepared substrates (targets) made of stainless steel 12X18H10T (diameter 32 mm, thickness 0,2 mm, height ~1,5 mm) and were dried under thermal lamp, taking measures to prevent boiling.

In course of drying of low-viscosity salt solutions, a peripheral brim is formed along the perimeter of the occupied area, while the inner surface is characterized by reticulation pattern due to uneven evaporation of the solvent.

One of the methods for improving thickness uniformity of the applied layer may be introduction of a vaporizable component having higher viscosity in the solution composition. Glycerol may be used as such a component.

10 samples were prepared for the purpose of studying the possibility of applying layers which thickness is optimal for obtaining EMF, investigation of surface non-uniformity when using different solution compositions and eventual effect of the substrate material.

Analysis of spectra shows that usage of americium nitrate solution results in increased pronouncedness of low-energy tails of peaks. Presence of low-energy tails indicates existence of gradient of active layer thickness.

A different pattern is observed for spectra of samples prepared using solution with added glycerol. Slight pronouncedness of low-energy tails and larger width of peaks at half-height indicate that uniform layer of increased thickness is obtained. Increase of the layer thickness may be caused by presence of "heavy" fractions in glycerol. It should be noted that presence of these fractions improves bonding of the layer to the substrate, preventing possible flaking and environmental pollution during analysis of samples and during assembly of experimental source of electric current.

Samples No. 7 ($\text{Am}-241$ in glycerol) and No. 8 ($\text{Am}-241$ nitrate) were used for comparative analysis of non-uniformity of thickness of active layer. It was found that the active layer prepared on the basis of nitrate solution has substantially higher non-uniformity as compared with the layer prepared on the basis of similar solution with added glycerol.

The conducted studies allowed to optimize the composition and parameters of the layer of ^{241}Am alpha-active substance for the purpose of creating sources of electric current based on nuclear energy. The composition of alpha-active layer was substantiated (solution of americium nitrate with addition of glycerol), non-uniformity of layer thickness and energy spectra of alpha particles of ^{241}Am isotope were investigated. Estimated maximum surface activity of the layer is $7 \text{ MBq}/\text{mm}^2$.

Keywords: ^{241}Am , MDM structure $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{NiCr}$, α -spectrometer, energy spectrum of alpha particles, glycerol, nitrate solution, viscosity, layer activity

For citation:

Egorenkov V. M., Prudnikov N. V. Study and Optimization of ^{241}Am Isotope Layers for Creation of Sources of Electric Current Based on Nuclear Energy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 27–34.

DOI: 10.17587/nmst.22.27-34

References

1. **Egorenkov V. M., Prudnikov N. V., Kuznecov V. V.** et al. Perspektivnie napravleniya issledovaniy v oblasti optiki i kvantovoi elektroniki, *Materialy Vserossiyskoy naychnoy konferencii "Tehnologii i materialy dlya ekstremalnih usloviy"* (prognoznie issledovaniya i innovacionnie razrabotki), 2018, pp. 250–252 (in Russian).
2. **Egorenkov V. M., Suvorov I. S., Prosyanyuk V. V.** et al. K voprosu ob avtonomnykh gibridnykh istochnikakh pitaniya na osnove superkondensatorov dlya raboty v ekstremalnih usloviyakh, *Materialy 12-oy Vserossiyskoy naychnoy konferencii "Tehnologii i materialy dlya ekstremalnih usloviy"*, 2017, pp. 67–73 (in Russian).
3. **Chernov V. A., Palagushkin A. N., Prudnikov N. V.** et al. Izgotovlenie i issledovanie svoystv nanostruktur dlya pryamogo preobrazovaniya yadernoy energii v elektricheskuyu s ispolzovaniem emissii vtorichnykh elektronov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2010, no. 11, pp. 2–9 (in Russian).
4. **Egorenkov V. M., Prudnikov N. V., Karavashkina N. P.** et al. Lazernaya nanokristallizatsiya materialov dlya polucheniya tonkoplennokh i obiemnykh izdeliy, *Materialy 10-th Vserossiyskoy naychnoy konferencii "Tehnologii i materialy dlya ekstremalnih usloviy"*, 2015, pp. 71–76 (in Russian).
5. **Chernov V. A., Stepanov V. A., Prudnikov N. V.** et al. Optimizatsiya sostava i razmerov istochnikov toka, osnovannykh na pryamom preobrazovanii yadernoy energii v elektricheskuyu s ispolzovaniem emissii vtorichnykh elektronov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2015, no. 2, pp. 57–64 (in Russian).
6. **Egorenkov V. M., Prudnikov N. V., Chernov V. A.** Miniaturnye nanostrukturirovaniye istochniki toka na osnove pryamogo preobrazovaniya yadernoy energii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 10, pp. 606–610 (in Russian).

УДК 661.879

DOI: 10.17587/nmst.22.34-38

А. А. Пустовалов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., ap25605@gmail.com,
Институт динамики геосфер Российской академии наук, г. Москва,
Л. А. Цветков, гл. специалист, levtsvet@gmail.com,
ООО "ЭкоБиоЭнергия", г. Кострома

ВЫСОКООБОГАЩЕННЫЙ НИКЕЛЬ-63 И ТРИТИЙ — БЕЗАЛЬТЕРНАТИВНАЯ ОСНОВА КРУПНОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ

Поступила в редакцию 22.10.2019

Появление изделий микросистемной техники с энергопотреблением на уровне нано-, микро- и милливатт требует миниатюризации индивидуальных источников энергии с увеличенной продолжительностью действия, способных обеспечить должную автономность и длительность эксплуатации перспективных разработок. Преобразование энергии радиоактивного распада в электрическую — один из возможных путей решения этой задачи. В работе анализируются, какие из известных радионуклидов удовлетворяют соответствующим требованиям. Внимание сосредоточено на выборе радионуклидов, пригодных для крупносерийного, рентабельного выпуска промышленностью долгоживущих источников энергоснабжения (атомных батарей), оставляя в стороне многочисленные эксклюзивные варианты единичного изготовления.

Ключевые слова: радионуклид, период полураспада, бета-излучение, удельная мощность, альфа-излучение, бета-вольтаика, атомная батарея

Выбор радионуклида для атомных батарей (АБ) основан на сравнительном анализе таких характеристик, как тип распада, период полураспада, мощность экспозиционной дозы, удельное энерговыделение, возможность и стоимость наработки в промышленном масштабе [1, 2]. Период полураспада радионуклида должен превосходить или быть соизмерим с заданным (более 10 лет) сроком службы АБ. Средняя энергия испускаемых заряженных частиц не должна превышать порога радиационных нарушений используемого полупроводникового преобразователя. Практически для всех полупроводников этот порог находится в диапазоне 170...400 кэВ, и это главное препятствие для использования в рассматриваемых АБ альфа-излучателей. Типичная энергия альфа-частиц в разы больше порога — около 5 МэВ (это не исключает применения α -активных изотопов в батареях с непосредственным сбором заряда, фотоэлектрических и освоенных на колебаниях консоли [3]).

Радионуклид не должен создавать дозиметрических проблем при эксплуатации АБ, в нем должны отсутствовать гамма-излучающие примеси, позитронное, тормозное и рентгеновское излучение. Радионуклид необходимо производить в достаточных количествах при относительно низкой стоимости.

В итоге выбор падает на радионуклиды, имеющие только "чистое" бета-излучение.

Бета-вольтаическая атомная батарея — это устройство, в котором энергия радиоактивного распада превращается в электрический ток. Она представляет собой симбиоз излучателя бета-частиц (быстрых электронов) и преобразователя со встроенным электрическим полем, предпочтительно полупроводника [1, 2, 4—6]. Под действием испускаемых радионуклидом бета-частиц в полупроводнике с $p-n$ -переходом образуются дополнительные носители заряда (электроны и дырки), а встроенное поле сепарирует их и превращает в электрический ток во внешней цепи. По сравнению с лучшими химическими источниками тока атомные батареи — новый класс источников электропитания, они имеют на 3—4 порядка большую энергоемкость, устойчивую работу при отрицательных температурах, отсутствие саморазряда и стабильно работают в течение десятилетий [2, 7].

Источником радионуклидов для АБ могут быть осколки деления ядерного горючего или изотопные мишени, облученные в ядерном реакторе или в ускорителе элементарных частиц.

В табл. 1 перечислены основные доступные β -излучающие радионуклиды.

Критически анализируем представленную в табл. 1 выборку β -излучателей.

Сера-35, фосфор-32 и кальций-45 имеют малый период полураспада, у фосфора-32 и криптона-85 неприемлемо жесткое β -излучение, получение кальция-45 и радия-228 в промышленном масштабе невозможно.

Прометий-147 уже использовался в бета-вольтаической АБ [1, 10]. Он выделяется из осколков деления, всегда загрязнен жестким гамма-излучателем прометий-146. Глубокая очистка от него — сложная и дорогостоящая задача изотопного разделения, для долгоживущей АБ он не подходит также ввиду относительно короткого периода полураспада.

Стронций-90 (Sr-90) — чистый β -излучатель, долгоживущий, но энергия β -частиц слишком велика. Sr-90 находится в равновесии с дочерним иттрием-90 (Y-90), в результате чего на каждые 10 000 актов распада стронция возникает один жесткий γ -квант с энергией 1,7 МэВ, что неприемлемо ввиду возникновения дозиметрических проблем.

Итого из множества известных изотопов остаются лишь три потенциальных претендента для использования в долгоживущей бета-вольтаической АБ: тритий, углерод-14 и никель-63. Их подробные характеристики показаны в табл. 2.

Конечно, хотелось бы использовать в АБ абсолютно "чистые" (мононуклидные) вещества, состоящие только из целевых нуклидов и свободные от любых "ненужных" излучений. Однако полностью избавиться от примесей нереально.

Таблица 1

Радионуклиды β -излучатели [8, 9]

Радионуклид	Период полураспада	Максимальная энергия β -частиц и γ -квантов (при наличии), кэВ
Никель-63	100,1 лет	66,7
Стронций-90	28,8 лет	546; γ 1700 (100%)
Тритий-3	12,3 года	18,6
Криптон-85	10,7 лет	687,1; 173; γ 514 (0,43%)
Сера-35	87 дней	167,1
Фосфор-32	14,2 дней	1710,6
Углерод-14	5730 лет	156,4
Кальций-45	162 дня	256,8
Прометий-147	2,62 года	224,1
Радий-228	5,75 лет	45,9

потому априори не может быть крупномасштабным. Скорость накопления очень мала вследствие малого сечения поглощения нейтронов. Годовое накопление 1000 Ки — это за пределами много, а обеспечит при КПД = 1 % суммарную электрическую мощность углеродных батарей всего лишь 3 мВт (!), работоспособных в течение тысячелетия, если выдержит полупроводник. Наверное, в виде эксклюзивного исключения такие батарейки кому-то понадобятся, но не в серийном производстве. Опасность аварийного попадания С-14 в среду обитания несомненна.

Никель-63 — единственный радионуклид "сам себе конструкционный материал". Безопасен биологически. Срок службы исчисляется десятилетиями, 50 лет и более. Легко совместим с кремнием и другими полупроводниками. Ныне производится в граммовых количествах, дорого. Использование патентов РФ № 2313149, № 2556891 и № 2629014 позволяет зарабатывать в год сотни килограммов никеля-63 без использования дефицитных изотопных каналов реакторов, не нарушая штатных режимов работы любых — исследовательских, промышленных, энергетических реакторов. Побочный характер наработки позволит снизить стоимость реакторного передела в сотни раз [13—15]. Никель-63 является ключевым радионуклидом, создающим возможность крупносерийного выпуска бета-вольтаических мини-батарей для многочисленных применений в космической, медицинской, микросистемной технике, включая концепцию "on chip", когда автономное питание СБИС обеспечивает батарея, смонтированная на том же чипе, что и СБИС.

Выводы

1. На основе результатов расчетных исследований представлен сравнительный анализ энергетических и радиационно-физических характеристик бета-излучателей, пригодных для использования в бета-вольтаических атомных мини-батареях.

2. По комплексу показателей (удельное энерговыделение, энергия бета-частиц, период полураспада, реальные возможности промышленной наработки) только два радионуклида — никель-63 с обогащением не менее 80 % и тритий в виде тритида титана TiT_2 или скандия ScT_2 , а также интерметаллида — $LaNi_5T_{6,7}$ целесообразно использовать для создания энергоёмких бета-

вольтаических АБ со сроком службы от 15 до 50 лет и их серийного производства.

3. Показана бесперспективность использования для этой цели углерода-14 ввиду довольно низкого значения удельного энерговыделения (1,32 мВт/г), принципиальных технических трудностей его промышленной наработки в больших объемах, а также потенциальной радиологической опасности в случае разрушения корпуса АБ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-08-00452.

Список литературы

1. Лазаренко Ю. В., Пустовалов А. А., Шаповалов В. П. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1992. 207 с.
2. Пустовалов А. А., Гусев В. В., Задэ В. В., Петренко Н. С., Тихомиров А. В., Цветков Л. А. Бета-вольтаический источник тока на основе никеля-63 // Атомная энергия. 2007. Т. 103, вып. 6. С. 353—356.
3. Li H., Lal A., Blanchard J. et al. Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever // J. Appl Phys. 2002, N. 92. P. 271—274.
4. Корлис У., Харви Д. Источники энергии на радиоактивных изотопах / Пер. с англ. М.: Мир, 1967.
5. Olsen L., Seeman S., Griffen B. Betavoltaic nuclear electric power sources // Trans. Electron Devices. 1969. Vol. 2. P. 481—483.
6. Кодоков В. М., Гусев В. В., Почтаков А. А., Пустовалов А. А. Особенности преобразования энергии радиоактивного распада в электрическую с использованием кремниевых полупроводников с $p-n$ -переходом // Радиационная техника. 1975. Вып. 11. С. 61—67.
7. Баранов В. Ю., Паль А. Ф., Пустовалов А. А., Старостин А. Н., Суэтин Н. В., Филлипов Ф. В., Фортгов В. Е. Радиоизотопные генераторы электрического тока // Изотопы. Свойства, получение, применение. Под ред. В. Ю. Баранова. М.: Физматлит, 2005.
8. Круглов А. К., Рудик А. П. Реакторное производство радиоактивных нуклидов. М.: Энергоатомиздат. 1985. 256 с.
9. Герасимов А. С., Зарицкая Т. С., Рудик А. П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. М.: ЭАИ. 1989. 575 с.
10. Lewis M. I., Seeman S. E. // Nucl. Technol. 1973. Vol. 17. P. 160—167.
11. Сайт URL: bmpd.livejournal.com/2480785.html
12. Подвиг П. Л. Стратегическое ядерное вооружение России. М.: ИздАТ, 1998. 492 с.
13. Пустовалов А. А., Тихомиров А. В., Цветков Л. А. Способ получения радионуклида никель-63. Патент РФ № 2313149 от 26.06.2006 г.
14. Пустовалов А. А., Цветков Л. А., Цветков С. Л., Костылев А. И. и др. Способ получения искусственного изотопа никель-63. Патент РФ № 2556891 от 20.07.2015 г.
15. Мокров Ю. Г., Логунов М. В. Способ получения радионуклида никель-63. Патент РФ № 2629014 от 24.08.2017 г.

A. A. Pustovalov, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: ap25605@gmail.com,
Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, 117334, Russian Federation,
L. A. Tsvetkov, Main Specialist, e-mail: levtsvet@gmail.com,
LLC "EcoBioEnergy", Kostroma, 156005, Russian Federation

Corresponding author:

Pustovalov Aleksey A., Ph. D., Leading Researcher, Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, 117334, Russian Federation, e-mail: ap25605@gmail.com

Highly Enriched Nickel-63 and Tritium — Non-Alternative Basis Mass Production Beta-Voltaic Batteries

Received on October 22, 2019
Accepted on November 05, 2019

The article describes reasons of choosing radionuclides for development using that beta-voltage nuclear power supply battery (NB) has permanent working resource more than 30 years, that can be used for wide range practice using. Investigate and analyze main radiation-physical parameters of the radionuclides "beta emitters" (maximum energy of the beta emitting spectrum, period of half-decay, specific energy deposition, dosimetry) that depend high technical and operational parameter of the Nuclear Battery (specific electric power, working safety, exploitation time, cost and etc) based at during capacity industrial radionuclide production. Proven that only Nickel-63 high purity & Tritium may be used for development wide practice application NB. Radio-nuclide Carbon-14 may be applied for development of exclusive Nuclear Battery only.

Keywords: radionuclide, half-life, beta radiation, power density, alpha radiation, beta voltaic, atomic battery

For citation:

Pustovalov A. A., Tsvetkov L. A. Highly Enriched Nickel-63 and Tritium — Non-Alternative Basis Mass Production Beta-Voltaic Batteries, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 34—38.

DOI: 10.17587/nmst.22.34-38

References

1. **Lazarenko Yu. V., Pustovalov A. A., Shapovalov V. P.** Malogabaritnyye yadernyye istochniki elektricheskoy energii, Moscow, Energoatomizdat, 1992, 207 p. (in Russian).
2. **Pustovalov A. A., Gusev V. V., Zadde V. V., Petrenko N. S., Tikhomirov A. V., Tsvetkov L. A.** Beta-voltai-cheskii istochnik toka na osnove nikelya-63, *Atomnaya energiya*, 2007, vol. 103, pp. 353—356.
3. **Li H., Lal A., Blanchard J.** et al. Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever, *J. Appl. Phys.*, 2002, no. 92, pp. 271—274.
4. **Korlis U., Kharvi D.** Istochniki energii na radioaktivnykh izotopakh. Per. s angl. Moscow, Mir, 1967.
5. **Olsen L., Seeman S., Griffen B.** Betavoltaic nuclear electric power sources, *Trans. Electron Devices*, 1969, vol. 2, pp. 481—483.
6. **Kodyukov V. M., Gusev V. V., Pochtakov A. A., Pustovalov A. A.** Osobennosti preobrazovaniya energii radioaktivnogo raspada v elektricheskuyu s ispolzovaniyem kremniyevykh poluprovodnikov s $p-n$ -perekhodom, *Radiatsionnaya tekhnika*, 1975, vol. 11, pp. 61—67 (in Russian).
7. **Baranov V. Yu., Pal A. F., Pustovalov A. A., Starostin A. N., Suetin N. V., Fillipov F. V., Fortov V. E.** Radioizotopnyye generatory elektricheskogo toka. V kn. *Izotopy. Svoystva. polucheniye. primeneniye.* Ed. V. Yu. Baranov. Moscow, Fizmatlit, 2005.
8. **Kruglov A. K., Rudik A. P.** Reaktornoye proizvodstvo radioaktivnykh nuklidov, Moscow, Energoatomizdat, 1985, 256 p. (in Russian).
9. **Gerasimov A. S., Zaritskaya T. S., Rudik A. P.** Spravochnik po obrazovaniyu nuklidov v yadernykh reaktorakh, Moscow, EAI, 1989, 575 p. (in Russian).
10. **Lewis M. I., Seeman S. E.** *Nucl. Technol.*, 1973, vol. 17, pp. 160—167.
11. bmpd.livejournal.com/2480785.html
12. **Podvig P. L.** Strategicheskoye yadernoye vooruzheniye Rossii, Moscow, Izdat, 1998, 492 p.
13. **Pustovalov A. A., Tikhomirov A. V., Tsvetkov L. A.** Sposob polucheniya radionuklida nikel-63. Patent RF № 2313149 ot 26.06.2006.
14. **Pustovalov A. A., Tsvetkov L. A., Tsvetkov S. L., Kostylev A. I.** et al. Sposob polucheniya iskusstvennogo izotopa nikel-63. Patent RF № 2556891 ot 20.07.2015.
15. **Mokrov Yu. G., Logunov M. V.** Sposob polucheniya radionuklida nikel-63. Patent RF № 2629014 ot 24.08.2017.

В. А. Тиняев, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", ст. инженер, ЗАО НТЦ "Модуль", Москва, e-mail: v.tinyaev@module.ru,
Х. М. Эль-Хажж, инженер, ЗАО НТЦ "Модуль", Москва, e-mail: khalil@module.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ СБИС

Поступила в редакцию 18.10.2019

Рассматриваются основные методы снижения энергопотребления микросхем, разработанных в соответствии с технологическими нормами 28–65 нм. Исследованы следующие техники оптимизации энергопотребления: стробирование тактового сигнала (clock gating), изменение порогового напряжения стандартных ячеек, введение отключаемых доменов питания и доменов питания с различными напряжениями, а также оптимизация набора используемых элементов. Приведены аналитические выводы об эффективности каждого из рассмотренных методов, подкрепленные результатами их практического применения в среде САПР "Cadence" с учетом влияния на производительность и конечный размер кристалла.

Ключевые слова: энергопотребление, микросхема, статическая мощность, динамическая мощность, физическое проектирование, стробирование тактового сигнала, домены питания, топология

Введение

На фоне растущей динамики развития микроэлектроники все большую актуальность приобретает вопрос оптимального сочетания производительности устройства (рабочей частоты), его портативности и энергопотребления. Разработчикам нередко приходится идти на компромиссы, жертвуя одним из вышеперечисленных параметров в пользу другого, более приоритетного в условиях технического задания проекта.

Мощность, потребляемая интегральной микросхемой, имеет статическую и динамическую составляющие. В свою очередь динамическая часть потребления определяется мощностными потерями при переключении (*switching power*), а также рассеиваемой мощностью внутри элемента (*internal power*). Статическая часть потребления микросхемы проявляет себя в состоянии покоя схемы и связана с токами утечки (*leakage power*) [1].

Рассмотрим каждую составляющую энергопотребления микросхемы подробнее.

1. *Динамическое потребление.* При переключении схемы, в частности при переключении транзистора из состояния логического нуля в состояние логической единицы, энергия расходуется на зарядку и разрядку нагрузочных емкостей. Ниже приведена схема инвертора, демонстрирующая пример зарядки и разрядки емкостей при переключении элемента (рис. 1). В большинстве случаев именно этот источник энергопотребления микросхемы является доминирующим, так как для зарядки и разрядки конденсаторов с высокой емкостью повсеместно требуется задействовать усилительные элементы, способные зарядить и разрядить высокую емкостную нагрузку на линиях соединений. Динамическая мощность переключения может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P_D = 0,5C \cdot V^2 \cdot F \cdot A, \quad (1)$$

где C — емкость нагрузки; V — напряжение питания; F — рабочая частота; A — средняя активность переключений.

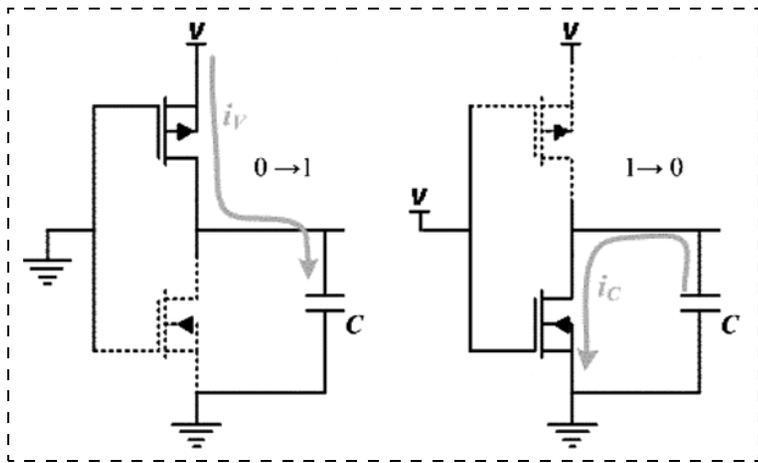


Рис. 1. Зарядка и разрядка емкостной нагрузки

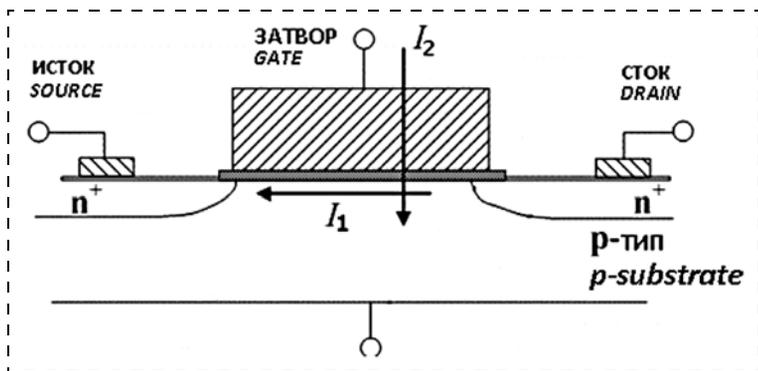


Рис. 2. Токи утечки в МОП-транзисторе

Теперь рассмотрим составляющую динамического потребления микросхемы, заключающуюся во внутреннем потреблении элементов. Внутреннее потребление элемента формируется из совокупности мощности, необходимой для зарядки и разрядки емкостей непосредственно внутри элемента, а также мощности, рассеиваемой на входных и выходных контактах элемента. Как правило, внутренняя составляющая динамического энергопотребления полностью определяется библиотеками формата ".lib", поставляемыми вместе с элементной базой. Данные библиотеки содержат множество таблиц с числовыми значениями потребления элемента, охватывающими все возможные режимы и условия работы элемента — техпроцесс, температуру, а также значение напряжения питания и др. Таким образом, при любом сочетании факторов техпроцесс — температура — напряжение питания, внутреннее потребление элемента будет учтено корректно.

2. *Статическое потребление.* С ростом степени интеграции микросхем ощутимый вклад в общее потребление конечного устройства привно-

сят токи утечек, возникающие в МОП-структурах, даже когда система находится в состоянии покоя. Формирование статического потребления определяется следующими явлениями в МОП-транзисторах: подпороговые утечки, связанные с током утечки от стока к истоку транзистора (I_1), а также ток утечки через затвор в подложку (I_2). Ниже приведена схема МОП-транзистора с указанием токов утечек (рис. 2) [1, 2].

Для снижения общего энергопотребления системы на кристалле обычно применяют комбинации нескольких методов. Более подробное исследование каждого метода приведено ниже. Особое внимание будет уделено методу стробирования тактового сигнала (*clock gating*), так как данный метод наиболее распространен в среде разработчиков цифровых микросистем и приводит к значительной экономии энергопотребления современных проектов с высокой степенью интеграции элементов на кристалле.

Метод стробирования тактового сигнала

Цепи распространения синхросигнала включают в себя мощные тактовые усилители и, как правило, имеют самую большую активность переключений. Как было отмечено ранее, мощность, рассеиваемая при зарядке и разрядке нагрузочных емкостей элементов, прямо пропорциональна частоте переключений элемента. Это, в свою очередь, приводит к значительным динамическим мощностным потерям на тактовых цепях микросхемы. Даже в тех случаях, когда конечный приемник (элемент, триггер, макрос и т. п.) тактового сигнала не переключается, тактовый сигнал продолжает переключаться и рассеивать энергию на цепях распространения. В современных технологических процессах (< 65 нм) мощностные потери на тактовых цепях могут составлять до 25—30 % от общего потребления микросхемы.

Для оптимизации энергоэффективности микросхем в целом, и дерева тактовых сигналов в частности, наиболее часто применяют метод отключаемых тактовых доменов, также известный как *clock gating* или метод стробирования тактового сигнала. Суть метода заключается в отключении тактовых сигналов в тех случаях, когда тактирование не требуется. На рис. 3 и 4 (см. четвертую сторону обложки) продемонстри-

рован общий вид схемы с применением техники стробирования тактового сигнала и без нее соответственно.

Схемотехнически данный метод реализуется несколькими способами.

1. *Введение clock-gate-элементов в цепи распространения тактового сигнала.* В тактовые цепи вводятся специальные *clock gate*-ячейки, представляющие собой логический элемент AND или OR. Схемы включения AND и OR *clock gate*-ячеек продемонстрированы на рис. 5 и 6 соответственно.

При использовании *clock gate*-ячейки AND, в те моменты времени, когда тактирование не требуется, достаточно подать "0" на вход ENABLE, чтобы добиться удержания постоянного состояния (в данном случае "0") для всей тактовой цепи и конечного тактируемого устройства. При использовании *clock gate*-ячейки OR, соответственно, необходимо подать "1" на вход ENABLE, чтобы добиться удержания постоянного состояния (в данном случае "1") для всей тактовой цепи и конечного тактируемого устройства. Таким образом удастся избежать динамических потерь мощности на всей последующей тактовой цепи [3].

Однако данная техника не лишена недостатков. Тактовый сигнал, проходя через ячейку AND или OR, может претерпеть искажение фронта на выходе. Искажение фронта тактового сигнала для всей последующей тактовой цепи вплоть до приемника может привести к метастабильному состоянию тактируемых устройств и, в свою очередь, к сбою работы всей микросхемы. Для предупреждения данной ситуации при использовании ячейки AND необходимо генерировать сигнал ENABLE с триггера, срабатывающего по спаду. Это обеспечит переключение сигнала ENABLE только в те моменты, когда тактовый сигнал находится в "0". Такая методика называется *Active-High Clock Gating*. При использовании ячейки OR необходимо, чтобы сигнал ENABLE поступал с триггера, работающего по фронту. Это обеспечит переключение сигнала ENABLE только в те моменты, когда тактовый сигнал находится в "1". Такая методика называется *Active-Low Clock Gating*.

2. *Введение интегрированной стробирующей ячейки CGIC.* Данная методика учитывает недо-



Рис. 5. Включение *clock gate*-ячейки AND в тактовую цепь



Рис. 6. Включение *clock gate*-ячейки OR в тактовую цепь

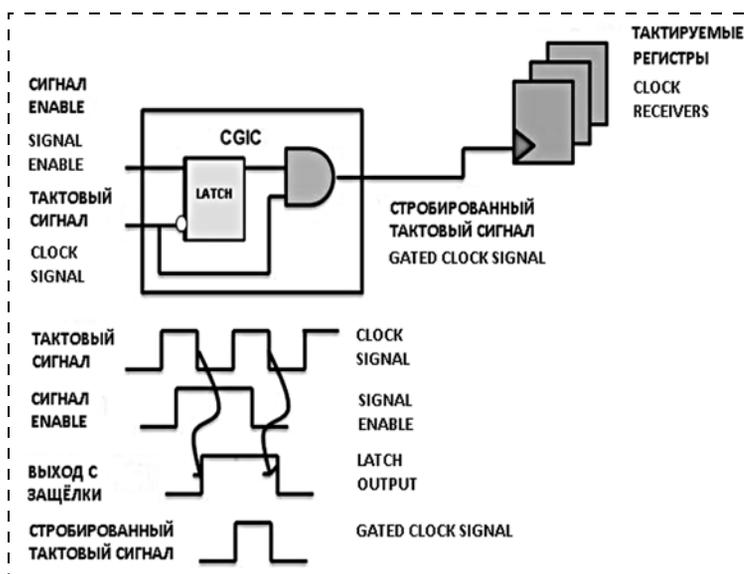


Рис. 7. Интегрированная стробирующая ячейка CGIC

статки описанного выше подхода. Суть методики заключается в применении специальных интегрированных *clock gate*-ячеек — *Clock Gating Integrated Cell* (CGIC). Введение подобных ячеек полностью исключает вероятность появления искажений фронта на выходе из ячейки стробирования. CGIC представляет собой связку *Latch*-триггера ("защелки") и AND-элемента. На рис. 7 приведена схема интегрированной *clock gate*-ячейки.

Принцип стробирования устроен следующим образом: если сигнал ENABLE соответствует логической "1", тактовый сигнал проходит дальше без каких-либо искажений. Если сигнал ENABLE соответствует логическому "0", тактовый сигнал стробируется, вся последующая тактовая цепь сохраняет постоянное состояние и тем самым

Таблица 1

Энергопотребление проекта с технологией 65 нм с применением метода *clock gating* и без него

Реализация проекта	Потребление, мВт		
	Динамическое	Статическое	Общее
Без применения <i>clock gating</i>	6434	553	6987
С применением <i>clock gating</i>	5714	553	6267

сводит к нулю динамическую составляющую мощностных потерь при переключении элементов в цепи [3].

В ЗАО НТЦ "Модуль" применяли метод интегрированных стробирующих ячеек CGIC в проекте, разработанном в соответствии с технологией 65 нм. В табл. 1 приведены результаты анализа потребляемой мощности проекта в критичных условиях, с применением метода стробирования тактового сигнала и без него.

Как видно из табл. 1, применение метода стробирования тактового сигнала позволило понизить общее потребление микросхемы на 10,3 %. Введение ячеек CGIC в проект не отразилось на производительности микросхемы. Увеличение общей площади кристалла составило менее 1 % от первоначального значения. Анализ данного метода для технологии 28 нм дал схожие результаты. Экономия составила 7...10 % от общего энергопотребления.

Метод изменения порогового напряжения и метод оптимизации набора элементов

Разработка современных высокопроизводительных кристаллов ведется с применением библиотек стандартных ячеек трех типов, отличающихся между собой значением порогового напряжения: LVT-тип (Low Voltage Threshold), SVT-тип (Standard Voltage Threshold) и HVT-тип (High Voltage Threshold). Стандартная ячейка представляет собой группу транзисторов и соединений между ними, которые реализуют либо некоторую логическую функцию (AND, OR, XOR, XNOR, инвертор), либо элемент хранения (например, триггеры flip-flop или latch). Элементы LVT-типа характеризуются низким пороговым напряжением, высоким статическим потреблением и высокой скоростью переключения. Их применяют в ситуациях, когда необходимо сделать упор на производительность и временные характеристики системы. Элементы HVT-

типа, в свою очередь, обладают высоким пороговым напряжением, низким статическим потреблением и низкой скоростью переключения. Их применяют в ситуациях, когда наибольший приоритет имеет оптимизация потребления микросхемы, в том числе в ущерб производительности. И, наконец, элементы SVT-типа представляют собой промежуточный вариант между LVT- и HVT-библиотеками, обеспечивая среднюю скорость переключения и относительно невысокие статические мощностные потери. Значение порогового напряжения напрямую влияет на быстродействие логического элемента. В связи с этим рассматриваемая методика применима только на некритичных по быстродействию цепях проекта.

Метод изменения порогового напряжения стандартных ячеек применялся во всех проектах, реализованных в ЗАО НТЦ "Модуль". В работе приведены числовые значения, полученные на основе анализа потребления двух разработанных микросхем, выполненных в соответствии с технологией TSMC 28 нм (технология монтажа "flip-chip" [5]). Одна из разработанных микросхем — SNK NM6408 [6] ("Проект 1" см. табл. 2) была представлена на 12-й Международной Авиакосмической выставке Aero India-2019. Упомянутые выше проекты были разработаны с применением всех трех типов логических элементов: LVT, HVT и SVT. В целях проведения полноценного сравнительного анализа потребления и быстродействия оба проекта были реализованы с применением четырех различных комбинаций элементной базы: только на HVT-элементах, только на LVT-элементах, на HVT- и SVT-элементах, и с использованием полного набора доступных библиотек стандартных ячеек HVT, SVT и LVT. Для более точной оценки влияния выбранной комбинации библиотек на конечное потребление и быстродействие из анализа энергопотребления были исключены такие заказные IP-блоки, как PCI-e, DDR3, SGMII и др. Изменения занимаемой стандартными ячейками площади оказались незначительными по сравнению с общей площадью кристалла ($\Delta S < 1\%$). В связи с этим данный параметр не был включен в сравнительные таблицы. Анализ потребляемой мощности проводили при самых критичных с точки зрения энергопотребления условиях: высокая температура, повышенное напряжение питания. В табл. 2 и 3 приведены числовые значения производительности и энергопотребления микросхем, полученные в среде САПР "Voltus IC Power Integrity" от компании "Cadence" [4].

Благодаря использованию комбинации различных наборов библиотек стандартных ячеек HVT/SVT/LVT с различными пороговыми напряжениями, удалось сэкономить до 10 % энергопотребления кристалла без ущерба быстродействию конечного устройства.

Описанный метод является основой для вспомогательной техники снижения общего потребления кристалла — метода оптимизации набора элементов. Данный метод является встроенным в современные САПР для разработки топологии систем на кристалле и применяется во всех проектах ЗАО НТЦ "Модуль".

Метод оптимизации набора элементов реализуется итерационно и может быть описан последовательностью следующих операций.

1. С помощью предварительного статического временного анализа системы определить перечень цепей, обладающих наибольшим запасом по быстродействию.

2. Проанализировать используемые в данных цепях библиотеки стандартных элементов и заменить их на менее мощные в целях экономии потребляемой мощности. Например, заменить LVT-элементы на SVT-элементы.

3. Заменяя элементы, необходимо провести полный статический временной анализ проекта для проверки функционирования и быстродействия микросхемы.

Таблица 2

Сводная таблица по энергопотреблению для проекта 1

Тип используемых элементов	Частота работы микросхемы (производительность), МГц	Общая потребляемая мощность логических элементов, Вт
LVT	800	35,4
HVT	690	31,1
HVT, SVT	770	31,9
HVT, SVT, LVT	800	33,0

Таблица 3

Сводная таблица по энергопотреблению для проекта 2

Тип используемых элементов	Частота работы микросхемы (производительность), МГц	Общая потребляемая мощность логических элементов, Вт
LVT	800	4,5
HVT	730	3,8
HVT, SVT	780	3,9
HVT, SVT, LVT	800	4,1

По приблизительным оценкам, данный метод позволяет снизить энергопотребление на 2...5 % от общего значения.

Метод отключаемых доменов питания

Данный метод применим для больших проектов, содержащих несколько независимых друг от друга кластеров или ядер.

Существует две методики отключения доменов питания: кольцевая методика и методика отключения рядов. Суть каждой методики сводится к размещению на кристалле *power-switch*-ячеек, которые ограничивают поступление тока по шинам земли и питания к ячейкам, расположенным в отключаемой области [8]. Схемы реализации данных методик представлены на рис. 8 и 9 (см. четвертую сторону обложки). *Power-switch*-ячейки отключают сетку питания от технологических рядов в нижнем слое металла, где подключаются стандартные ячейки проекта.

Рис. 9 наглядно демонстрирует, что при использовании методики отключения рядов разработчик может свободно варьировать площадь отключаемой от питания области, размещая *power-switch*-ячейки на необходимом ему числе рядов питания. Минимальное необходимое число *power-switch*-ячеек рассчитывают исходя из значения мощностных потерь отключаемой области и ее периметра. Чем больше потребление оптимизируемой области, тем больше *power-switch*-ячеек потребуется для отключения области от сетки питания.

Кольцевая методика применяется для отключения небольших областей, так как для отключения блока с большим собственным потреблением может потребоваться значительно больше ячеек, чем может быть размещено по периметру отключаемой области.

Методику отключения рядов применяли в ЗАО НТЦ "Модуль" для разработки СБИС K1888BC018 [7]. Технически методика была реализована выделением в проекте пяти отключаемых доменов питания. На основе полученной вариативности режимов питания удалось реализовать несколько режимов работы. Результаты анализа энергопотребления в различных режимах работы микросхемы приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, применение метода отключаемых доменов питания позволило снизить энергопотребление микросхемы более чем в 3 раза.

Результаты исследования метода отключения доменов питания для СБИС K1888BC018

№	Домены питания							Описание режима	Максимальная потребляемая мощность, Вт
	PD_RTC	PD_ARMU	PD_SMU	PD_NMU0	PD_NMU1	PD_FILTER	PD_ADC		
1	+	+	+	+	+	+	+	Режим максимальной производительности	2,8
2	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	Режим частичной экономии мощности	1,1...2,8
3	+	+	+	-	-	-	-	Режим наименьшего потребления мощности, при котором возможен поиск и слежение за спутниковым сигналом	1,1
4	+	+	-	-	-	-	-	Режим минимальной производительности	0,7
5	+	-	-	-	-	-	-	Режим часов. Работает только счетчик реального времени	0,00015

Заключение

Рассмотренные в работе методы оптимизации энергопотребления СБИС широко применяются при разработке современных микросхем. Целесообразность и эффективность каждого метода определяется его общим влиянием на проект, как позитивным, так и негативным. Анализ практического применения рассмотренных методов позволяет сделать вывод о том, что наиболее оптимальный подход к решению задачи снижения потребления микросхемы — это применение комбинаций отдельных методов, полностью или частично. Ответственность за выбор того или иного метода лежит на разработчике.

Одним из наиболее сбалансированных и часто применяемых методов оптимизации потребления является метод стробирования тактового сигнала с применением интегрированной стробирующей ячейки CGIC (*clock gating*). Применение данного метода оказывает наименьшее негативное влияние на конечную площадь и производительность системы на кристалле, позволяя сэкономить более 10 % энергии.

В пределах проекта, критичного по быстродействию и производительности, стоит внимательно и аккуратно применять метод изменения порогового напряжения стандартных ячеек. При некорректном выборе элементной базы разработчик рискует понизить значение конечной рабочей частоты будущего устройства. Однако при грамотном выборе библиотеки/комбинации библиотек стандартных ячеек разработчик может добиться значительной экономии энергии конечного устройства без вреда производительности.

Метод отключаемых доменов питания применим в проектах, где есть независимые узлы,

кластеры или ядра. Этот метод позволяет отключать питание на неиспользуемых в данный момент времени узлах микросхемы, что позволяет снизить энергопотребление в несколько раз.

Стоит отметить, что снижение энергопотребления не только увеличивает время работы конечного устройства, но и позволяет уменьшить нагрев микросхемы. Это, в свою очередь, открывает для конечного устройства новые области эффективного и безопасного применения.

Список литературы

1. Blaauw D., Martin S., Mudge T., Flautner K. Leakage current reduction in VLSI systems // Journal of Circuits, Systems and Computers. 2002. Vol. 11 (6). P. 621—635.
2. Vikram Singh, Sandeep K. Arya, Manoj Kumar. Different Perspectives of Low Power Design for CMOS VLSI Circuits // International Journal of Electronics Engineering. 2018. Vol. 10, Issue 2. P. 604—613.
3. Chandrakasan A., Bowhill W. J., Fox F. Design of high performance microprocessor circuit, 2nd ed. IEEE Press, 2001, 586 p.
4. Voltus User Guide. Product version 16.12: Updated in August 2016. San Jose: Cadence Design Systems Inc. 2016. 138 p.
5. Тиняев В. А. Топологические особенности разработки микросхем с применением технологии монтажа flip-chip и wire bond // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 7. С. 416—421.
6. Эйсымонт А. Л., Черников А. В., Косоруков Д. Е., Насонов И. И., Комлев А. А. Гетерогенная многопроцессорная система на кристалле с производительностью 512 Gflops // Наноиндустрия. 2018. № 9 (82). С. 135—143.
7. Косоруков Д. Е., Эйсымонт А. Л., Осипов В. Г., Панфилов А. П., Черников В. М., Виксне П. Е., Шелухин А. М., Насонов И. И. СБИС на базе ядра NMC3 для высокопроизводительного программного приемника навигационных сигналов // Электронные компоненты. 2016. № 3. С. 66—71.
8. Haghdad K., Anis M., Ismail Y. Floorplanning for low power IC design considering temperature variations // Microelectronics Journal. 2011. Vol. 42 (1). P. 85—89.

V. A. Tinyaev, Postgraduate Student, National Research Nuclear University "MEPhI", Senior Engineer, JCR RC "Module", Moscow, Russian Federation, e-mail: v.tinyaev@module.ru,
K. M. El-Khajj, Engineer, JCR RC "Module", Moscow, Russian Federation, e-mail: khalil@module.ru

Corresponding author:

Tinyaev Vladislav A., Postgraduate Student, National Research Nuclear University "MEPhI", Senior Engineer, JCR RC "Module", Moscow, Russian Federation, e-mail: v.tinyaev@module.ru

Analysis of the Power Minimization Methods Efficiency for Digital VLSI Circuits

Received on October 18, 2019

Accepted on October 25, 2019

Nowadays microelectronics develops extremely fast, challenging engineers all around the world to find new efficient solutions. Especially, when chip competition market is constantly growing, becoming more diverse, complicated and demanding. The problem of compromise between device portability, power consumptions and performance becomes more and more crucial. It is common for modern design engineers to balance these parameters accurately to produce the most balanced, reliable and competitive devices.

Following article is dedicated to the main basics methods of power minimization and optimization in modern digital VLSI circuits, implemented according to 28–65 nm technologies. The following methods were considered: clock gating methodology, application of various combinations of standard cell libraries with different threshold voltages and power domain switch-off method.

Discovered power optimization techniques are widely used in the implementation process of modern high-effective VLSI circuits. Both negative and positive impact on the final device determines the appropriateness and efficiency of the considering method as well as the technical task of the project. All the presented analytical conclusions have been proved by practical application of every single method in case of real project in "Cadence" CAD tool "Voltus IC Power Integrity v.18.1". Chip area and performance influence were estimated after every method implementation.

Keywords: power consumption, static power, dynamic power, clock gating, switch-off domains, topology, VLSI, power-switch cell, standard cells, physical design

For citation:

Tinyaev V. A., El-Khajj K. M. Analysis of the Power Minimization Methods Efficiency for Digital VLSI Circuits, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 39–45.

DOI: 10.17587/nmst.22.39-45

References

1. **Blaauw D., Martin S., Mudge T., Flautner K.** Leakage current reduction in VLSI systems, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2002, vol. 11 (6), pp. 621–635.
2. **Vikram Singh, Sandeep K. Arya, Manoj Kumar** Different Perspectives of Low Power Design for CMOS VLSII Circuits, *International Journal of Electronics Engineering*, 2018, vol. 10, is. 2, pp. 604–613.
3. **Chandrakasan A., Bowhill W. J., Fox F.** Design of high performance microprocessor circuit, 2nd edition, *IEEE Press*, 2001, 586 p.
4. **Voltus** User Guide. Product version 16.12: Updated in August 2016. — *San Jose: Cadence Design Systems Inc.*, 2016, 138 p.
5. **Tinyaev V. A.** Topologicheskie osobennosti razrabotki mikroshem s primeneniem tehnologii montazha flip-chip i wire bond, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 7, pp. 416–421 (in Russian).
6. **Eisymont A. L., Chernikov A. V., Kosorukov D. E., Nasonov I. I., Komlev A. A.** Geterogennaya mnogoprocesornaya sistema na kristalle s proizvoditelnostyu 512 Gflops, *Nanoindustriya*, 2018, no. 5 (82), pp. 135–143 (in Russian).
7. **Kosorukov D. E., Eisymont A. L., Osipov V. G., Panfilov A. P., Chernikov V. M., Vixne P. E., Sheluhin A. M., Nasonov I. I.** SBIS na baze jadra NMC3 dlja vysokoproizvoditel'nogo programmnoho priemnika navigacionnyh signalov, *Elektronnye komponenty*, 2016, no. 3, pp. 66–71. (in Russian).
8. **Haghdad K., Anis M., Ismail Y.** Floorplanning for low power IC design considering temperature variations, *Microelectronics Journal*, 2011, vol. 42 (1), pp. 85–89.

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХРАЗУМА. ЧАСТЬ I

Поступила в редакцию 08.11.2019

Оценены перспективы и проблемы создания сверхразума. Методологической основой рассмотрения являются предложенные ранее полная электронная интерпретация функционирования мозга и теория сознания человека.

В части I работы выделены основные свойства мозга человека, представляющие интерес для разработки сверхразума, и проведено их сравнение со свойствами ИС твердотельной электроники. Рассмотрены перспективы и проблемы создания сверхразума в рамках выделенных материалистического и идеалистического направлений его разработки.

Ключевые слова: *сверхразум, мозг, полная электронная интерпретация, сознание человека, наноэлектроника, математическое моделирование, искусственный интеллект*

Посвящаю светлой памяти моего сына Константина.

"Разве машина не может выполнять нечто такое, что следовало бы характеризовать как мышление, но что было бы весьма отлично от того, что делает человек?"

А. Тьюринг [1]

"Есть искушение отмахнуться от образа высокоинтеллектуальных машин как плода воображения писателей-фантастов, но это будет ошибкой — и, в принципе, нашей самой худшей ошибкой в жизни".

С. Хокинг [2]

Введение

Возможны два качественно различных подхода к рассмотрению перспектив и проблем, связанных с развитием искусственного интеллекта (ИИ). Первый подход исходит из утверждения: "человек — машина, а точнее биологическая машина". Второй основывается на аксиоме: "человек не является машиной".

Инициаторами первой точки зрения являются два выдающихся француза: Рене Декарт (1596—1650 гг.) и Жюльен Офре де Ламеттри

(1709—1751 гг.). Первый утверждал, что животные являются автоматами, а второй пошел еще дальше и в явном виде сформулировал, что "человек — машина" в своей ставшей легендарной книге с этим же названием. В настоящее время данная точка зрения становится все более популярной, прежде всего в среде ученых.

Тем не менее, второй точки зрения придерживается, по-видимому, большинство людей. Автор с уважением относится к вере этих людей, если она искренна, однако считает эту точ-

ку зрения фактически догматизмом (аксиомой), за которой зачастую неявно скрывается мнение о сверхпревосходстве *Homo sapiens*, а в явном виде — понимание о машине в узком смысле этого слова.

Таким образом, *рассмотрение проблем и перспектив создания сверхразума в работе будет проводиться исходя из точки зрения, что человек — биологическая машина*. Методологической основой этого рассмотрения будут являться полная электронная интерпретация функционирования мозга и теория сознания человека, предложенные автором ранее [3—11]. Однако сразу же замечу, что для того чтобы рассмотреть перспективы и проблемы развития ИИ, строго говоря, необходимо предсказать развитие полной системы, а именно: "общество — человек — системы ИИ — окружающая среда". Вряд ли кто-то в состоянии сделать это в настоящее время в полном объеме даже на ближайшее десятилетие, учитывая бурное развитие систем ИИ. В связи с этим, с одной стороны, в работе рассматривается частный, однако фактически главный вопрос о сверхразуме, образно говоря, о "вершине" ИИ, а с другой стороны, — часто, к сожалению, возможно говорить только о вероятностях развития соответствующих событий, и не более того.

Свойства мозга

Для начала процитирую двух известных специалистов. Первый — когнитивный психолог Дж. Андерсон, а второй — изобретатель и аналитик в области ИИ Р. Курцвейл.

"Исследователи в области... ИИ... пытались создать программы, которые позволяют компьютерам проявлять интеллектуальное поведение. Хотя в этой области в течение сорока лет велась активная работа и были достигнуты значительные успехи, исследователи ИИ все еще не знают, как создать программу, которая соответствовала бы человеческому интеллекту... Это объясняется не тем, что способности компьютеров ниже, чем у человека, а скорее тем, что мы еще недостаточно хорошо знаем, как организована обработка информации в мозге" [12].

"Создатели искусственного интеллекта не пытаются воспроизвести человеческий мозг в буквальном смысле, однако неизбежно приходят к тем же самым принципам" [13].

Хотя первая цитата слегка устарела, обе цитаты в целом верно отражают состояние дел и

сегодня. Действительно, прежде чем создавать сверхразум, целесообразно хотя бы ответить на вопрос: "Чем отличается мозг человека в качестве информационной системы?" Попытаемся на него ответить, используя по максимуму известные данные, так как все может быть важным, даже казалось бы на первый взгляд незначительное!

В работах автора [3—11] были предложены полная электронная интерпретация функционирования мозга, а также теория сознания человека, при этом в них же указывались ряд важных свойств, характерных для мозга. Для начала выделим эти свойства.

Прежде всего, было показано [3, 4, 6], что *вся* нейронная цепь мозга может интерпретироваться в качестве нелинейной электрической цепи (первый тип), а следовательно, мозг допустимо рассматривать как объект электроники. Наиболее близкий искусственный аналог — интегральная схема (ИС) твердотельной электроники — электрическая цепь второго типа. Сравнение цепей первого и второго типов позволило выделить следующие важные отличия [3, 4, 6, 14]: 1) нейронная цепь реализована на органических материалах, а ИС — на неорганических; 2) в цепи первого типа имеет место ионная проводимость (основными являются ионы калия, натрия, кальция и хлора), а второго типа — электронная и дырочная проводимости; 3) нейронная цепь — сначала растущая, а затем постоянно модифицируемая цепь, что достигается в результате взаимодействия электрических и химических процессов, и является, пожалуй, наиболее важным отличием и преимуществом цепей первого типа; 4) нелинейная электрическая цепь первого типа характеризуется не только крайне сложной топологией, но и вариацией свойств составляющих ее казалось бы однотипных элементов (тела клеток, аксоны, дендриты, шипики, синапсы и др.), которые к тому же могут изменяться во времени; 5) основными, активными элементами в цепях первого типа являются каналы (ионные каналы, ионные насосы и др.) — сложные наноэлектромеханические системы (НЭМС), в отличие от ИС, где активными элементами являются диоды и транзисторы. Отмечу, что типов, видов и разновидностей каналов неизмеримо больше, чем диодов и транзисторов; 6) с точки зрения электроники мозг человека — это, прежде всего, набор нелинейных электрических цепей двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.

Отмеченные свойства позволили автору интерпретировать мозг не просто как объект электроники, а как объект органической гибридной наноэлектроники [3—5, 15]. Поэтому в работе [9] отмечалось, что корректнее оценивать уровень интеграции мозга человека как объекта наноэлектроники не по числу нейронов (около 10^{11}), а по числу каналов M , которых по оценке автора около $10^{19} \dots 10^{21}$.

В результате, кроме фантастического уровня интеграции, для мозга как объекта наноэлектроники важнейшее значение имеют, по крайней мере, следующие свойства [10]: 1) гибридизация (принципиальную роль играют как минимум два типа процессов — электрические и химические); 2) гибкая системная организация (архитектура), обеспечивающая обработку разнообразных входящих внешних и внутренних сигналов (информации); 3) индивидуальность нейронных (нелинейных электрических) цепей у каждого человека, которые к тому же постоянно изменяются (пластичность) под влиянием внешних и внутренних воздействий; 4) большое разнообразие элементов (многие из них просто индивидуальные) электрических (нейронных) цепей, включая активные элементы, т. е. отмеченные НЭМС.

Все это характеризует мозг человека как очень мощную и гибкую информационную систему, обладающую не только количественными, но и качественными отличиями от ИС, в частности, важнейшим свойством — сознанием, предназначенным, прежде всего, для более качественной обработки информации [10]. Хорошо известно, что именно это свойство пока недостижимо в области ИИ.

Что же характерно для сознания человека? Оно было подробно рассмотрено в работах [9—11], поэтому здесь выделю лишь наиболее важную для дальнейшего информацию.

Строго говоря, для детального анализа сознания необходимо рассмотреть полную систему [9, 16]: мозг — другие составляющие нервной системы — тело — окружающая среда. Было отмечено, что, к сожалению, это невозможно, так как строгое математическое моделирование такой задачи, и даже просто мозга, которым, главным образом, определяется сознание и квалиа (идея интернализма) относятся к труднорешаемым задачам класса NP [3—11]. Так, достаточно отметить, что общее количество информации по числу возможных состояний активных элементов мозга, т. е. каналов (открыт — закрыт), 2^{MK} , где

M — число каналов; K — число поколений срабатывания ($K \gg 1$). Взяв даже указанный нижний предел, т. е. $M = 10^{19}$, получаем еще более фантастическое по сравнению с уровнем интеграции число. А все это означает, что как сознание, так и квалиа могут быть описаны только приближенно, причем, судя по грандиозности задачи, с достаточно серьезными аппроксимациями.

Предложенная монистическая материалистическая теория сознания эмерджентного типа позволяет более глубоко понять такие сложные феномены, как творческое мышление, самоизлечение и измененные состояния сознания [10]. Более детальное рассмотрение процесса осознанной обработки сенсорной информации позволило также сформулировать главный принцип функционирования мозга — принцип преобразований сигналов и энергетических реконструкций [11]. Отмечу, что под преобразованием сигналов и энергетическими реконструкциями подразумеваются не только электрические, но и, как минимум, химические процессы [11]. А это означает, что мозг качественно отличается от объектов твердотельной электроники, в частности ИС, в которых, как правило, наиболее важны электрические (рабочие) процессы*. Привлечение принципа позволило прийти к заключению, что "осознание человека — главный доминирующий процесс энергетической реконструкции в соответствующей коалиции нейронов в оптимальном диапазоне активации бодрствующего состояния нормального человека" [11]. Показано, что и квалиа, т. е. чувственные ощущения, могут быть также поняты в соответствии со сформулированным принципом функционирования мозга человека [11].

Были также приведены аргументы о том, что характер как обработки информации в мозге, так и природы жизни — аналого-цифровой, т. е. общий [11]. Отмечено, что достоинством и одновременно недостатком мозга является то, что он приближенно отражает действительность.

Таким образом, Природой была решена суперсложная оптимизационная комплексная проблема, а именно [10]: 1) взаимодействие различных сигналов (механических, оптических, тепловых,

* Рассматривая некоторые вопросы, например надежности ИС, конечно же, может быть необходимым анализировать влияние всего комплекса важных из возможных процессов и воздействий, а именно: механических, химических, радиационных, тепловых и др.

химических, электрических и др.) при обработке информации, что дополнительно обеспечивается сенсорными системами; 2) гибкость связей; 3) малые размеры (объем мозга, а, строго говоря, всего тела человека); 4) малые энергетические затраты (потребляемая мозгом мощность в состоянии бодрствования составляет всего около 20 Вт) и др. К сожалению, аналогичные проблемы в твердотельной электронике еще очень далеки от действительно оптимальных решений даже по отмеченному комплексу вопросов.

Перспективы и проблемы

Исходя из отмеченной выше информации*, рассмотрим перспективы создания сверхразума и связанные с этим проблемы.

Сначала приведу два необходимых определения. ИИ человеческого уровня (ИИЧУ) — это "способность освоить большинство профессий, по крайней мере тех, которыми мог бы владеть среднестатистический человек" [17]. Сверхразум — "это любой интеллект, значительно превосходящий когнитивные возможности человека фактически в любых областях" [17]. Нетрудно заметить уязвимость этих определений в виде хотя бы следующих во многом неопределенных выражений: "среднестатистический человек", "значительно превосходящий", да, и собственно, "интеллект", т. е. фактически основное в нашем случае понятие. Очень просто и убедительно о рассматриваемом феномене написал один из классиков в области ИИ — М. Минский [18]: "Интеллектом мы называем те процессы, сути которых еще не понимаем".

В связи с этим не могу не привести весьма поучительное, оригинальное и эмоциональное недавнее высказывание известного немецкого психолога и нейробиолога Э. Пеппеля, а именно [19]: "Люди даже не знают, что имеют в виду, когда говорят о разуме. В действительности довольно забавно, что они хотят сконструировать системы с искусственным интеллектом, сравнимым с их собственным, поскольку совсем непонятно, что они имеют в виду, когда говорят о своем интеллекте. Это одна из многих глупостей, которые преследуют человечество уже много веков.

* Замечу, что мною отмечены далеко не все свойства мозга. Например, известно, что имеет место постоянное обновление различных молекул мозга (и всего тела), хотя сами нейроны, образно говоря, "долгожители". Каково влияние этого обновления? В ИС подобного как раз избегают.

Если люди хотят смоделировать свои мыслительные инструменты в неких артефактах как репрезентацию собственного интеллекта, то первое, что им следует сделать, — это выяснить, что именно требуется смоделировать. На данный момент проделать такое невозможно, поскольку не существует даже таксономии или классификации функций, которые позволили бы осуществить этот проект в виде действительно научного или технологического начинания. Есть только умные слова, с помощью которых люди лишь создают видимость понимания.

Как это ни странно, отсутствие подобной таксономии, по-видимому, не очень волнует людей; довольно часто они очаровываются изображениями (цветастыми картинками, создаваемыми машинами), которые замещают мышление. В сравнении с классической биологией, химией или физикой, нейробиологии и физиологии недостает классификации. Люди заблудились в концептуальных джунглях. Что они имеют в виду, когда говорят о сознании, разуме, интеллекте, личности, субъективности или даже о более простых понятиях вроде памяти, восприятия, эмоций или внимания? Отсутствие таксономии проявляется в различии мнений и систем взглядов, которые их "ученые" выражают в своих эмпирических потугах и теоретических измышлениях, продираясь через мир неизведанного".

Несмотря на эти в целом пессимистические высказывания, отмечу следующее. Во-первых, подобные неопределенности в понятиях встречаются не только в общественных и гуманитарных науках, где их действительно много, но и в естественных и технических науках. В связи с этим, по-видимому, по аналогии с математикой, в которой введено понятие "труднорешаемые задачи", целесообразно ввести понятие "трудноформулируемые термины". "Сознание", "интеллект" бесспорно относятся к таким трудноформулируемым терминам (понятиям). Во-вторых, рассматриваемый вопрос находится на "пересечении" многих областей из общественных, гуманитарных, естественных и технических наук, а следовательно, характеризуется исключительной степенью сложности. В-третьих, без должного понимания функционирования мозга, убедительной теории сознания весьма проблематично добиться существенного прогресса в понимании рассматриваемого вопроса, т. е. должной и указанной таксономии или классификации задач. В-четвертых, мозг человека часто работает при

решении задач со значительными неопределенностями, т. е. для него это обычное явление. В-пятых, согласно отмеченному мнению выдающегося английского ученого С. Хокинга (см. эпиграф) рассматриваемый вопрос исключительной степени важности, и это действительно так.

Трудности количественной характеристики человеческого интеллекта привели к созданию ряда его теорий. В 1993 г. американский психолог Дж. Кэрролл предложил трехуровневую теорию интеллекта, находящую все большее число сторонников. "Трехуровневая теория интеллекта признает существование единой общей познавательной способности (g), дополненной спектром широких и ограниченных способностей" [20]. Замечу, что число широких способностей равно 8, а ограниченных способностей — 64 [20]. Даже указанные цифры способностей являются отражением очень широкого диапазона вариаций человеческого интеллекта, особой сложности феномена.

Хотя и существует много определений понятия "интеллект", мы будем придерживаться достаточно простого и емкого, приведенного в блестящем учебнике [21]: "интеллект — способность к целенаправленному адаптивному поведению, в том числе умение извлекать пользу из опыта, решать задачи и логически рассуждать".

По изложенным причинам продолжим рассмотрение проблем и перспектив создания сверхразума, однако, учитывая отмеченное выше, т. е. то, что мы имеем дело с областью со значительными неопределенностями, высочайшей степени сложности.

Проведенный анализ позволил условно выделить всего лишь три направления создания ИИЧУ и сверхразума, а именно: 1) материалистическое; 2) идеалистическое; 3) гибридное. Они разбиты и кратко названы в соответствии с той основой, на которой будут реализовываться. Рассмотрим их последовательно.

Материалистическое направление. К этому направлению автор относит следующие виды: 1) биологический интеллект; 2) электронный интеллект. Основой и того и другого является материя.

Биологический интеллект, а можно, в принципе, говорить о его многих уровнях, достигает человеческого уровня, но реализован не искусственно, а естественным путем. Отсюда следует очевидный и очень важный для нас вывод о том, что ИИЧУ, в принципе, достигим. Ведь Природа

это сделала! Вопрос о создании сверхразума на этой основе был рассмотрен в важной книге [17]. Приведу несколько выдержек из нее. "Потенциал биологического совершенствования в перспективе так высок, что, возможно, его вполне хватит для появления человека сверхразумного — по крайней мере в его начальной стадии. В этом нет ничего удивительного. В конечном счете именно так возник человек разумный... Явно решаемая задача биологического улучшения интеллектуальных способностей, особенно основанного на генетической селекции... В лучшем случае они* приведут к возникновению сравнительно слабой формы сверхразума".

В свое время подход биологического усовершенствования автор назвал "от имеющегося" [22]. И хотя на настоящий момент времени этот путь, действительно выглядит медленным и, возможно, приводящим к "сравнительно слабой форме сверхразума", однако, с точки зрения автора, — это все же вполне реальный путь достижения сверхразума. В случае глубокой модернизации принципиально важными здесь будут этические проблемы.

Электронный интеллект означает путь создания ИИЧУ и сверхразума на основе электроники. Согласно предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга можно сделать вывод о том, что *создание, по крайней мере, ИИЧУ на основе электроники, в принципе, возможно!* Однако, несмотря на этот в целом оптимистический вывод, необходимо иметь в виду следующее.

Для создания искусственного электронного аналога мозга необходимо будет воспроизвести многие (а возможно и все) из характерных черт, отмеченных в разделе "Свойства мозга", что представляет собой грандиозной сложности задачу. К наиболее важным из свойств, прежде всего, отнесу следующие: 1) уровень интеграции, т. е. около $10^{19} \dots 10^{21}$ активных элементов; 2) аналого-цифровой характер обработки информации; 3) малые энергетические затраты; 4) малые размеры; 5) гибридизация; 6) индивидуальность нейронных цепей. Здесь более детально сопоставим свойства 1—4 с возможностями наиболее продвинутых объектов твердотельной электроники, в частности ИС, так как это можно сделать количественно.

* Имеются в виду методы биологического улучшения.

Сравнение по уровню интеграции было проведено в работе [10]. Предположив, что уровень интеграции наноэлектронных ИС в настоящее время около $5 \cdot 10^9$ активных элементов, приходим к выводу, что только для достижения уровня интеграции мозга в области твердотельной микро- и наноэлектроники потребуется около 60 лет [10], если ее развитие будет продолжаться согласно закону Мура, что сомнительно. Попытка же сегодня воспроизвести уровень интеграции мозга потребует более 10^{10} ИС?! Оценив массу ИС с уровнем интеграции 10^9 в 1 г, получаем итоговый объект с массой 10^7 кг. Что, говоря образно, небоскребы* строить будем? Автор уже не говорит о надежности и энергопотреблении такого твердотельного "монстра". Для сравнения: средняя масса мозга человека около 1,5 кг, а масса тела — 60...70 кг.

Интересная сравнительная оценка функционального быстродействия мозга (даже без учета параллельной обработки информации) с возможными ИС наноэлектроники будущего с уровнем интеграции около 10^{12} была проведена в работе [23] и привела авторов к выводу о преимуществе мозга по этому параметру приблизительно на два порядка. Замечу, что, к сожалению, неясно, когда реально будет достигнут взятый за ориентир уровень интеграции.

Проанализируем далее вопрос по важнейшему фактору — энергопотреблению. Первым кто это сделал был Дж. фон Нейман, а именно [24]: "Рассеяние энергии в центральной нервной системе человека (в мозгу) достигает примерно 10 ватт. Поскольку, как указывалось выше, речь идет о 10^{10} нейронов, это означает рассеяние энергии 10^{-9} ватта на нейрон. В электронной лампе рассеяние энергии имеет порядок (в типичном случае) от 5 до 10 ватт, для полупроводникового триода эта величина имеет порядок 10^{-1} ватта. Следовательно, в отношении рассеяния энергии естественные органы превосходят искусственные примерно в 10^8 — 10^9 раз."

Уточним оценку великого ученого, сделанную более 60 лет тому назад (!), в соответствии с современными данными. Автор встречал в литературе оценки рассеиваемой энергии (точнее потребляемой мощности P) в мозгу человека в состоянии бодрствования от 10 до 25 Вт**, т. е.

* Масса самого высокого небоскреба "Бурдж—Халифа" около $5 \cdot 10^8$ кг.

** Эти цифры являются ярким свидетельством в пользу того, что мы имеем дело с наноэлектроникой.

порядок величины верный. Число же нейронов сейчас оценивается в диапазоне $(86,1 \pm 8,1) \cdot 10^9$, т. е. около 10^{11} (на порядок больше). Таким образом, уточненная оценка будет еще ниже — около 10^{-10} Вт на нейрон.

А сейчас сделаем другую оценку, но уже на активный элемент, как это принято в микро- и наноэлектронике [25], а в данном случае для мозга — это каналы, т. е. НЭМС (см. ранее). Так, проходящий ток I через канал в открытом состоянии — единицы пикоампер, при изменении напряжения V несколько десятков милливольт, а среднее время открытия канала $\tau = 1...2$ мс [26]. Для оценки работы A на одно переключение используем известную формулу [25]:

$$A = P\tau = IV\tau. \quad (1)$$

В результате получим A , равную в диапазоне $(10^{-16}...10^{-17})$ Дж на переключение.

Следует подчеркнуть, что полученный результат не нарушает фундаментальные ограничения, и в частности, накладываемое соотношением неопределенности для энергии [27]. И это принципиально важно. Для сравнения по прогнозу [28] энергия переключения для транзисторов в 2030 г. достигнет около $0,5 \cdot 10^{-15}$ Дж на элемент. Таким образом, мозг по энергопотреблению пока вне конкуренции.

Важным, с точки зрения автора, является и характер обработки информации в мозгу человека, т. е. аналого-цифровой. И тут, вообще говоря, возможны три разновидности электронного интеллекта, а именно: 1) аналоговый; 2) цифровой; 3) аналого-цифровой. "Цифровой интеллект" был рассмотрен в работе [17] и считается одним из перспективных для создания сверхразума. На первый взгляд может показаться, что разница между цифровой (она, как известно, основная для ИС) и аналого-цифровой реализацией незначительна, так как в схемотехнике хорошо известно, что аналоговые функции могут быть реализованы на цифровой основе. Так то оно так, но ведь за это придется опять же "заплатить" увеличением объема устройства. И автор не исключает, что, говоря метафорически, нам придется строить уже не один "небоскреб", а "города небоскребов".

Из проведенного ранее рассмотрения (см. "Свойства мозга") и детализации в виде количественных оценок лишь по некоторым свойствам можно сделать вывод о том, что *электронная ре-*

ализация ИИЧУ, т. е. в полном объеме, в ближайшее время вряд ли возможна*.

Важно отметить, что, как следует из формулы (1), Природа "пожертвовала" при фиксированном значении работы переключения активных элементов их быстродействием, что и позволило в сочетании с другими свойствами в конечном итоге провести отмеченную ранее *супероптимизацию* в относительно малых объемах, достичь высочайшей экономичности и эффективности системы в целом в обработке самой разнообразной информации.

Основное преимущество твердотельной электроники, как известно, в высоком быстродействии переключения активных элементов (гораздо меньшими значениями τ), что в конечном итоге и позволило создать компьютеры, некоторые гаджеты и т. п., которые по множеству характеристик (вычислениям, обработке больших массивов данных и т. п.) уже превосходят мозг человека (см. также далее).

Допускаю, что более полная искусственная реализация аналога мозга человека будет также возможна на основе органических материалов, так как, в принципе, Природа нам показала успешное направление работ. Однако, к сожалению, органическая электроника развита в настоящий момент времени крайне слабо.

Тем не менее, *учитывая главный принцип функционирования мозга — принцип преобразования сигналов и энергетических реконструкций* (см. раздел "Свойства мозга") *воспроизведение, по крайней мере приближенное, сознания и квалиа в рамках электронного интеллекта, в принципе, теоретически возможно. Именно в этом, пожалуй, главное преимущество материалистического направления в целом.*

Возможны ли другие виды интеллекта в рамках данного направления? Не исключаю, однако здесь рассмотрены наиболее реальные и перспективные на ближайшее (обозримое) будущее. Необходимо при этом подчеркнуть, что пределы на рост возможностей сверхразума будут накладываться такими известными физическими ограничениями, как скорость света, принцип неопределенности Гейзенберга и т. п., т. е. главное при этом, чтобы законы Природы не запрещали

* Если возможна искусственно в полном объеме вообще? Автор уже отмечал, что, в принципе, обхитрить Природу можно — это клонирование человека [22], но это не будет по-настоящему искусственный объект.

такой рост. Дополнительные, кроме фундаментальных физических, и весьма существенные ограничения могут и будут накладываться в результате попытки провести оптимизацию по множеству, зачастую противоречивых, характеристик и параметров. Как мы видим, Природа весьма успешно справилась с этой суперзадачей в рамках биологического интеллекта, "отбраковав" при совершенствовании множество других вариантов. Именно поэтому становится понятным отмеченный Р. Курцвейлом факт (см. ранее). По мнению автора, *материалистическое направление также перспективно для создания роботов с высоким уровнем ИИ, а также нейрокомпьютеров.*

Идеалистическое направление. Это направление связано с математическим моделированием ИИЧУ и сверхразума. Здесь условно можно выделить два пути (соответственно вида): 1) на основе полномасштабного моделирования (полная эмуляция) мозга; 2) попытка создания систем моделирования, реализующих ИИЧУ и сверхразум.

Первый путь полной эмуляции мозга человека многими специалистами считается одним из самых перспективных (см., например, [3, 4, 7, 13, 17, 29, 30]). Что касается ИИЧУ, то здесь, по крайней мере, понятно основное направление работ. Необходимо, прежде всего, создать более или менее удовлетворительную теорию функционирования мозга, включая сознание, на основе которой и будет осуществлена полная эмуляция мозга. В то же время в работе [17], ввиду отсутствия полной модели мозга, делается неутешительный вывод, что такая модель "вряд ли будет осуществима в ближайшем будущем".

Автор видит определенные перспективы использования для полной эмуляции мозга предложенных теории сознания и комплексного иерархического подхода исследования мозга, основанного на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами, подробно описанных в работах [3, 4, 7, 9—11]. К сожалению, для их практической реализации потребуется также немалое время.

Но даже, если такие более или менее адекватные теория, модели будут созданы, ранее отмечалось (см. раздел "Свойства мозга"), что сознание и квалиа могут быть описаны, судя по всему, с достаточно серьезными приближениями. Добавим сюда и то, что программирование основывается на языке, т. е. достаточно абстрактных конструкциях, а также неполноту информации о

самом мозге. А все это означает, что реализация искусственного бессмертия путем "заливки" полной эмуляции мозга соответствующего человека в компьютер может не привести к ожидаемому результату. Кроме того, экспериментальные данные все больше свидетельствуют о том, что процессы, происходящие в мозгу, находятся на грани хаоса [20], а это означает, что в этом случае очень важны начальные условия. Достаточно небольшого отклонения от них и в конечном итоге могут быть получены качественно отличающиеся результаты работы искусственного мозга (хорошо известный "эффект бабочки") от настоящего мозга. В этом же плане интерес представляет и известное доказательство А. Тьюринга и А. Черча о существовании невычислимых функций, но которые можно описать [31]. Не исключено, что именно это мы имеем в случае хотя бы некоторых качественных понятий, действенный мозг.

И тем не менее, автор считает, что приближенная и даже грубая эмуляция мозга может быть полезна в медицине, например, с целью "реставрации сознания" у человека, теряющего его в результате надвигающейся деменции. Очевидно, что чем раньше будет осуществлена такая эмуляция (до серьезного прогрессирования деменции), тем лучше может быть результат последующей "реставрации". Помощником в этом случае может оказаться сам мозг ввиду его невероятной пластичности. Важным будет также создание соответствующих интерфейсов "мозг — машина" (см. далее).

Несмотря на условность оценок, интересен также вопрос о том, сколько приблизительно необходимо флопсов*, чтобы моделировать функционирование мозга человека? Одна из оценок приведена в работе [31]: "Перемножение примерно 10^{11} нейронов, примерно 10^4 синапсов на нейрон и одного (10^0) возбуждения нейрона в секунду дает примерно 10^{15} флопс — такого быстрого действия достаточно для симуляции человеческого мозга". Приведу свою оценку. Так как число активных элементов, т. е. каналов, 10^{19} с временем открытия канала 10^{-3} с и с одним возбуждением нейрона в 1 с, то оценка будет в диапазоне от 10^{16} до 10^{19} флопс. Оценки двух известных специалистов [31]: Д. Модхи (IBM) — $38 \cdot 10^{15}$ флопс; нейробиолога Г. Маркрама —

* Число операций компьютера с числами с плавающей запятой в секунду.

около 10^{18} флопс. Для функциональной симуляции головного мозга по оценке Р. Курцвейла потребуется от 10^{14} до 10^{16} флопс, а подобной оценке Г. Моравика — 10^{14} флопс [13]. В то же время возможности самого мощного современного суперкомпьютера Summit — около $2 \cdot 10^{17}$ флопс. Таким образом, по оценке автора *производительности самого мощного суперкомпьютера может быть недостаточно для детального моделирования (полной эмуляции) мозга человека.*

Более простыми, т. е. осуществимыми на современных компьютерах, могут быть различные (промежуточные) варианты имитационного моделирования мозга с привлечением экспериментальных данных по его исследованию. Однако и здесь, скорее всего, предстоит огромная, серьезная работа.

Предположим, что ИИЧУ создан. Далее рядом специалистов разделяется точка зрения, впервые высказанная И. Гудом, о "рекурсивном саморазвитии (самосовершенствовании)", в результате чего ИИ совершит "гигантский скачок в уровне интеллекта после достижения некоего критического порога" [29] ("интеллектуальный взрыв") и будет доведен до сверхразума. Хотя автор и не исключает возможность такого развития событий, однако все же отмечу следующее: 1) бесконечное, как считают некоторые сторонники этой гипотезы**, самосовершенствование невозможно ввиду отмеченных физических ограничений, а практическая реализация сверхразума все равно будет осуществлена на физическом объекте (носителе), т. е. компьютере и т. п. (см. далее), а следовательно, не исключены традиционные вопросы о заикливании, остановке; 2) неясен вопрос о возможности значительного превосходства (см. ранее) сверхразума над ИИЧУ. Что это такое? Если речь идет о скоростном сверхразуме (ИИЧУ, но намного быстрее [17]), то это, в принципе, ясно, если о качественном сверхразуме (превосходящем качественно интеллект человека), то это неясно (см. ранее); 3) для меня очевидно, что сверхразум, если его создадут, будет также допускать ошибки, как и обычный человек, хотя бы при отсутствии полных у него данных об анализируемом процессе (задаче), т. е. его возможности не будут безграничны. В то же

** Некоторые [29] считают, что И. Гуд представил доказательство реальности "интеллектуального взрыва". Автор так не считает ввиду наличия расплывчатых формулировок в "доказательстве".

время некоторые считают, что это будет "бог в ящике". По-моему, это наивность! В качестве примера. Не думаю, что даже сверхразум будет в состоянии ответить однозначно на вопрос: "Как возникла Вселенная?"

В связи с изложенным выше и ранее *вопрос о качественном сверхразуме, т. е. значительном превосходстве над ИИЧУ в результате рекурсивного самосовершенствования (интеллектуального взрыва), с точки зрения автора, открыт: "Возможно ли это?"*

Рассмотрим вопрос о создании систем моделирования, реализующих ИИЧУ и сверхразум. Уже отмечалось, что быстроедействие активных элементов современных ИС намного превосходит быстроедействие активных элементов мозга, поэтому, в принципе, возможна реализация различных систем, превосходящих мозг человека. И это направление уже развивается. В качестве таких систем с высоким уровнем ИИ (своеобразных прообразов ИИЧУ) можно привести: поисковые системы Google, Amazon, некоторые разработки компаний IBM, Apple, DeepMind, Microsoft и др. Отмечу также программу AlphaGo, которая была разработана компанией Google-DeepMind и выиграла матч в го у профессионала высшего дана. Программа AlphaGo, в отличие от Deep Blue и Watson (см. далее), не ориентирована на особое специально разработанное аппаратное обеспечение. В основу AlphaGo положены общие принципы машинного обучения, в частности глубинное обучение с использованием многоуровневых нейронных сетей, и является важным шагом в развитии ИИ.

Несмотря на эти очевидные успехи, *даже самые продвинутые (передовые) системы ИИ пока не могут сравниться с интеллектуальными возможностями человека по широте спектра и гибкости, способности к развитию, потому что, как правило, являются узкоспециализированными (специальными) системами, не обладают сознанием и квалиа! И тем не менее, это очень важное, реальное и перспективное направление развития ИИ.*

Список литературы

1. **Тьюринг А.** Может ли машина мыслить? М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. 112 с.
2. **Хокинг С.** Краткие ответы на большие вопросы. М.: Эксмо, 2019. 256 с.
3. **Абрамов И. И.** Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.

4. **Абрамов И. И.** Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
5. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52—54.
6. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.
7. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45—54.
8. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49—53.
9. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2018. № 5. С. 308—320.
10. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2018. № 6. С. 368—384.
11. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2019. № 9. С. 555—574.
12. **Андерсон Дж.** Когнитивная психология. 5-е изд. СПб.: Питер, 2002. 496 с.
13. **Курцвейл Р.** Эволюция разума. М.: Изд-во "Э", 2015. 352 с.
14. **Абрамов И. И.** Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 1. С. 49—64.
15. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34—37.
16. **Абрамов И. И.** Мозг человека — шедевр естественной электроники. Проблемы и перспективы исследования // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы радио- и нанотехнологий", 2017, Россия, Санкт-Петербург. — С. 79—86.
17. **Бостром Н.** Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 496 с.
18. **Минский М.** Сообщество разума. М.: Изд-во АСТ, 2018. 592 с.
19. **Что мы думаем** о машинах, которые думают: Ведущие мировые ученые об искусственном интеллекте / Д. Брокман. М.: Альпина нон-фикшн, 2017. 549 с.
20. **Как работает** ваш мозг. Внутри самого сложного объекта во Вселенной / под. ред. К. Уильямс. М.: Изд-во АСТ, 2019. 256 с.
21. **Майерс Д.** Психология. Мн.: Попурри, 2006. 848 с.
22. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. IV. Квантовомеханические формализмы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24—32.
23. **Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А.** Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона.

Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 5. С. 288—297.

24. **Нейман Дж.** Вычислительная машина и мозг / Кибернетический сб. Вып. 1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 11—60.

25. **Валиев К. А.** Микроэлектроника: достижения и пути развития. М.: Наука, 1986. 144 с.

26. **Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А.** От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.

27. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974. 752 с.

28. **International** technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.

29. **Баррат Дж.** Последнее изобретение человечества: Искусственный интеллект и конец эры Homo sapiens. М.: Альпина нон-фикшн, 2019. 396 с.

30. **Kaku M.** The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.

31. **Тегмарк М.** Жизнь 3.0. Быть человеком в эпоху искусственного интеллекта. М.: Изд-во АСТ: CORPUS, 2019. 560 с.

I. I. Abramov, Dr. Sci., Professor, nanodev@bsuir.edu.by,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus,

E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Prospects and Problems of Supermind Development. Part I

Received on November 08, 2019

Accepted on November 18, 2019

The prospects and problems of supermind creation are estimated. The previously proposed full electronic interpretation of brain functioning and the theory of human consciousness are the methodological basis of consideration.

Consideration of the problems and prospects of supermind creation in the work is carried out according to the point of view that man is a biological machine. The key properties of the brain as an information system are identified in Part I for this purpose. It is shown that Nature has solved a super difficult optimization complex problem (superoptimization) when creating a human brain. A comparison of the brain and IC leads to the conclusion that similar problems in solid-state electronics are very far from optimal solutions. The conducted analysis made it possible to distinguish conditionally three areas of artificial intelligence of the human level and supermind development, namely: 1) materialistic; 2) idealistic and 3) hybrid.

The materialistic and idealistic development areas are analyzed in the first part of the work. The prospects and problems of artificial intelligence of the human level and supermind creation are estimated in the framework of the distinguished development areas.

Keywords: *supermind, brain, full electronic interpretation, human consciousness, nanoelectronics, simulation, artificial intelligence*

For citation:

Abramov I. I. Prospects and Problems of Supermind Development. Part I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 46—56.

DOI: 10:175587/nmst.22.46-56

References

1. **Turing A. M.** Computing machinery and intelligence // *Mind*, 1950, Vol. 49, pp. 433—460.

2. **Hawking S.** Brief answers to the big questions. Space-time Publications Ltd., 2018.

3. **Abramov I. I.** Mozg kak obekt jelektroniki. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (In Russian).

4. **Abramov I. I.** Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.

5. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 52—54 (in Russian).

6. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoy gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' II, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 45—53 (in Russian).

7. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 5, pp. 45—54 (in Russian).
8. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' IV, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 49—53 (in Russian).
9. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part I. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, no. 5, pp. 308—320.
10. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part II. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, no. 6, pp. 368—384.
11. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part III. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 555—574.
12. **Anderson J. R.** Cognitive psychology and its implications. Fifth edition. Worth Publishers and W. H. Freeman, 2000.
13. **Kurzweil R.** How to create a mind: The secret of human thought revealed. Viking, 2012.
14. **Abramov I. I.** Prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 49—64.
15. **Abramov I. I.** Problems and principles of physics and simulation of micro- and nanoelectronics devices. I. Basic positions. *Nano- and microsystemnaya tekhnika*, 2006, no. 8, pp. 34—37 (in Russian).
16. **Abramov I. I.** The human brain — a masterpiece of natural electronics. Problems and research perspectives, *International scientific and technical conference "Actual problems of radio and film technology"*, 2017, Russia, St. Petersburg, pp. 79—86 (in Russian).
17. **Bostrom N.** Superintelligence. Path, dangers, strategies. N. Y.: Oxford University Press, 2014.
18. **Minsky M.** The society of mind. Simon & Schuster, 1988.
19. **What to think** about machines that think. Today's leading thinkers on the age of machine intelligence / Ed. by J. Brockman. New York: Harper Perennial, 2015.
20. **How your brain** works. Inside the most complicated object in the known Universe. Hodder & Stoughton Ltd., 2017.
21. **Myers D. G.** Psychology. 5-th ed. N. Y.: Worth Publishers, 1998.
22. **Abramov I. I.** Problems and principles of physics and simulation of micro- and nanoelectronics devices. IV. Quantum-mechanical formalisms, *Nano- and microsystemnaya tekhnika*, 2007, no. 2, pp. 24—32 (in Russian).
23. **Karushkin N. F., Obukhov I. A., Smirnova E. A.** Semiconductor components and electronic technology devices in the short wave section of the microwave radiation. Part III // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 288—297.
24. **Von Neumann J.** The computer and the brain. New Haven, Connecticut: Yale University Press, 1958.
25. **Valiyev K. A.** Mikroelektronika: dostizheniya i puti razvitiya. Moscow, Nauka, 1986. 144 p. (in Russian).
26. **Nicholls J. G., Martin A. R., Wallace B. G., Fuchs P. A.** From neuron to brain. 4-th ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2001.
27. **Landau L. D., Lifshits Ye. M.** Kvantovaya mekhanika. Nerelyativistskaya teoriya. Moscow, Nauka, 1974. 752 p. (In Russian).
28. **International** technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.
29. **Barrat J.** Our final invention: Artificial intelligence and the end of the human era. New York, Thomas Dunne Books St. Martin's Press, 2013.
30. **Kaku M.** The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York, Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
31. **Tegmark M.** Life 3.0: Being human in the age of artificial intelligence. Vintage Books, 2017.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
 Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 22.11.2019. Подписано в печать 22.12.2019. Формат 60×88 1/8. Заказ МС120. Цена договорная
 Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье А. А. Пустовалова, Л. А. Цветкова
**«ВЫСОКООБОГАЩЕННЫЙ НИКЕЛЬ-63 И ТРИТИЙ –
 БЕЗАЛЬТЕРНАТИВНАЯ ОСНОВА КРУПНОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА
 БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ»**

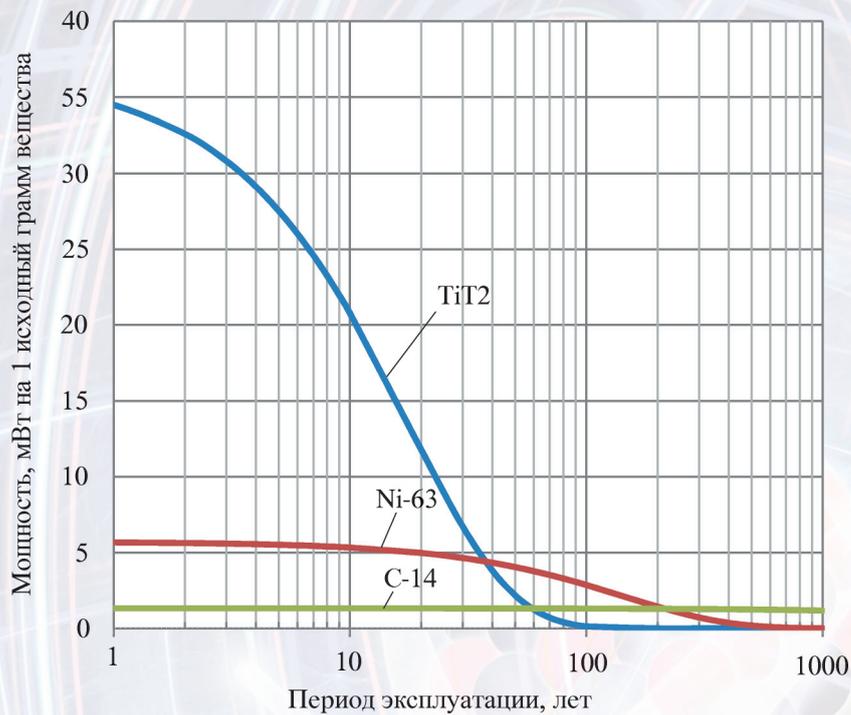


Рис. 2. Изменение со временем мощности (энергии распада), выделяемой 1 исходным граммом β-излучателя

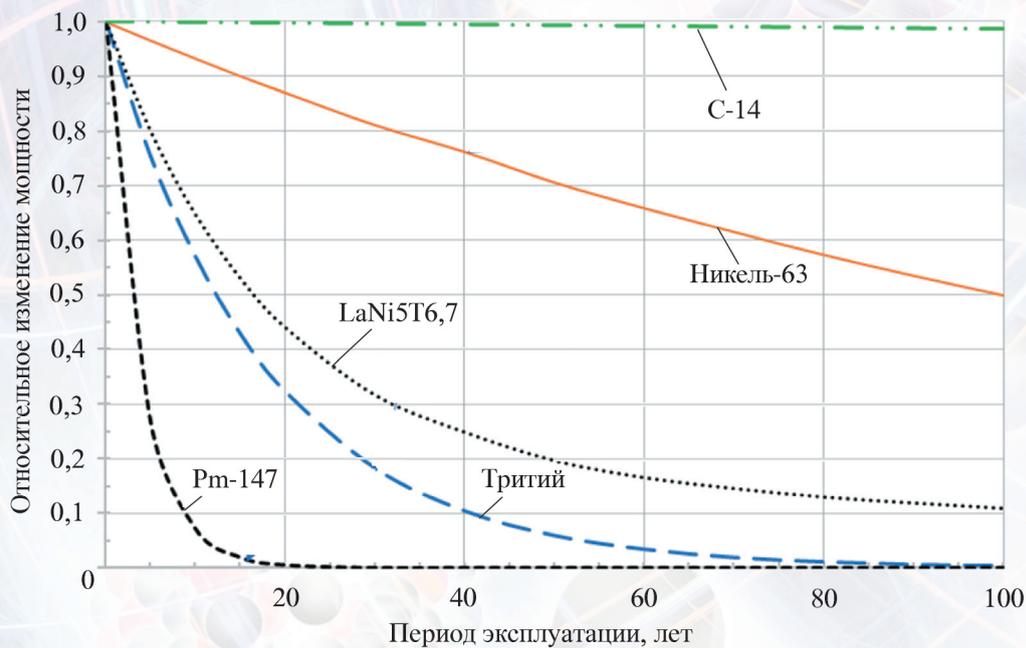


Рис. 3. Относительное падение мощности β-излучателей во времени

«АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ СБИС»

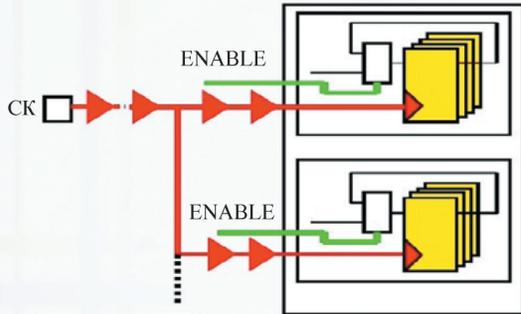


Рис. 3. Общий вид тактовой цепи без применения *clock gating*

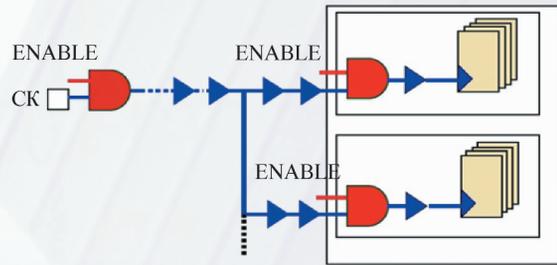


Рис. 4. Общий вид тактовой цепи с применением *clock gating*

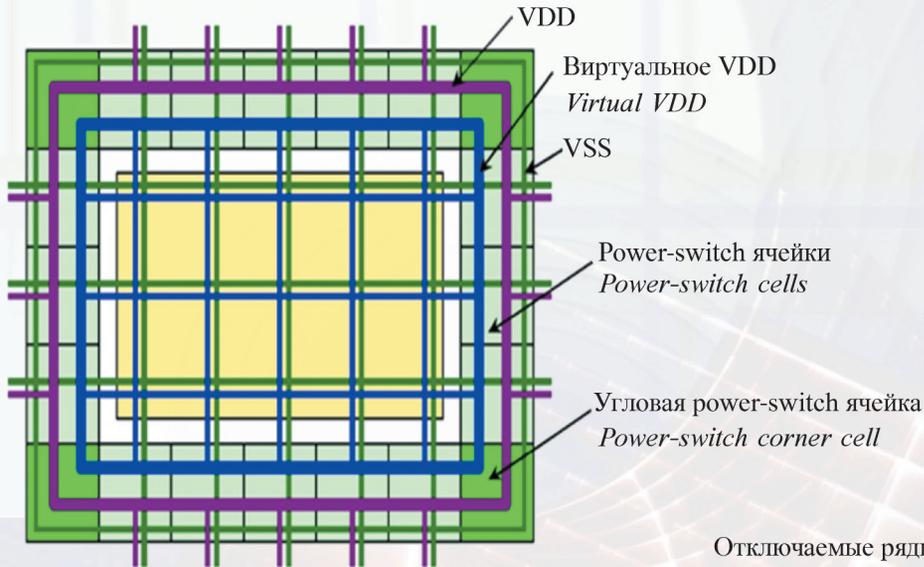


Рис. 8. Кольцевой метод отключения доменов питания

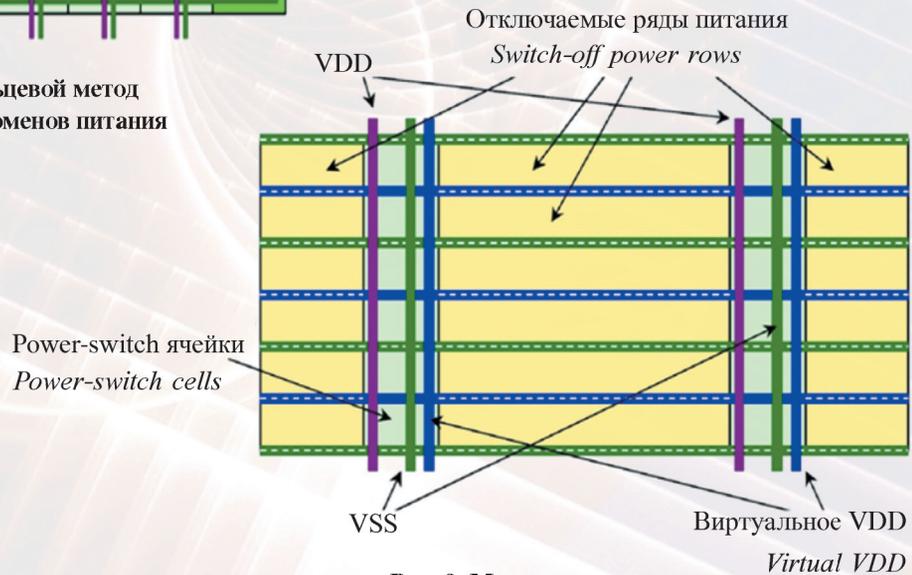


Рис. 9. Метод отключения рядов