

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

---

**Материалы научно-технической конференции  
«Микроэлектроника и информатика - 2017»**

**Сборник статей**

*(Зеленоград, 19 - 20 апреля 2017 г.)*

Москва 2017

М33 Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика - 2017»: сборник статей. - М.: МИЭТ, 2017. - 232 с.: ил.

ISBN 978-5-7256-0815-1

В сборнике статей конференции «Микроэлектроника и информатика - 2017» представлены результаты научных исследований, отобранные редакционной коллегией по итогам выступлений, в области микро- и нанoeлектроники, нанотехнологий, информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и технологий, биомедицинских систем.

Сборник представляет интерес для специалистов в области электроники, информационных технологий и управляющих систем.

Редакционная коллегия:

*Гаврилов С.А., докт. техн. наук, профессор - главный редактор.*

*Гагарина Л.Г., докт. техн. наук, профессор.*

*Капугин В.В., докт. техн. наук, профессор.*

*Короткова Т.Л., докт. экон. наук, профессор.*

*Кочетков М.П., канд. техн. наук, доцент.*

*Крупкина Т.Ю., докт. техн. наук, профессор.*

*Ларионов Н.М., канд. техн. наук, профессор.*

*Неволин В.К., докт. физ.-мат. наук, профессор.*

*Переверзев А.Л., докт. техн. наук, доцент.*

*Портнов Е.М., докт. техн. наук, профессор.*

*Прокофьев А.А., докт. пед. наук, профессор.*

*Ращин В.М., докт. техн. наук, профессор.*

*Селищев С.В., докт. физ.-мат. наук, профессор.*

*Тереженко С.А., докт. физ.-мат. наук, профессор.*

Термодинамический подход к оценке опасности и риска в устройствах микроэлектроники

*А.В. Астапович, Д.В. Яковенко*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия,*

*e-mail: Astalina19@rambler.ru; paskalitikys@yandex.ru*

**Thermodynamic approach to danger and risk assessment  
in microelectronics devices**

*A.V. Astapovich, D.V. Yakovenko*

*National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Russia,*

*e-mail: Astalina19@rambler.ru; paskalitikys@yandex.ru*

В данной работе представлен метод оценки термодинамической опасности и риска в техногенных системах микроэлектроники. Предлагается термодинамически оценивать риск, как вероятную величину изменения энтропии системы и ее окружения за определенный промежуток времени. Были оценены величины техногенных опасностей и рисков, а так же проведено сравнение полученных результатов с величинами опасности и риска природных катаклизмов.

*Ключевые слова:* энтропия, термодинамический риск, энергетическая концепция, работа разрушения.

The article presents a method for estimating the thermodynamic danger and risk in technogenic systems of microelectronics. It is proposed to thermodynamically evaluate the risk as a probable value of the change in the entropy of the system and its environment over a certain period of time. The values of man-caused dangers and risks were estimated, and the results were compared with the magnitude of the danger and the risk of natural disasters.

*Keywords:* entropy, thermodynamic risk, energy-entropic concept, work of destruction.

### Оценки использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе плосковых структур

Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куksenko

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники,  
г. Томск, Россия,

email: gazizovsk@yandex.ru, zhvezhnin@gmail.com, ksergp@mail.ru

### Estimates of the use of renumbering of subintervals of boundaries of conductors and dielectrics for manyvariant analysis of mikrostripline structures

R.R. Gazizov, E.V. Lezhnin, S.P. Kuksenko

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Russia,

email: gazizovsk@yandex.ru, zhvezhnin@gmail.com, ksergp@mail.ru

Выполнены аналитические и вычислительные оценки ускорения многократного вычисления емкостной матрицы конфигурации проводников и диэлектриков за счет использования алгоритмов перенумерации элементов матрицы системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и блочного LU-разложения для ее решения. Сравнение выполнено с исходным алгоритмом вычисления емкостной матрицы, основанным на последовательной версии LU-разложения для решения СЛАУ. Для этого получены выражения для оценки ускорения в аналитическом виде. Для сравнения использованы две структуры с матрицами СЛАУ порядка 1100 и 1700. Выявлено, что ускорение, вычисленное аналитически ниже вычислительно. Кроме того, ускорение зависит от числа изменений матрицы СЛАУ - с ростом порядка матрицы увеличивается ускорение.

*Ключевые слова:* системы линейных алгебраических уравнений, многовариантный анализ.

Analytic and computational estimates of the acceleration of multiple calculation of the capacitive matrix of the configuration of conductors and

dielectrics by using the renumbering algorithms of matrix elements of a system of linear algebraic equations and block LU-decomposition for its solution are made. Comparison with the initial algorithm for calculating a capacitive matrix based on a serial version of the LU decomposition for solving a linear system of algebraic equations is made. For this fact expressions were obtained for the estimation of the acceleration in the analytical form. The two structures with a linear system of algebraic equations matrices of the order of 1100 and 1700 were used for comparison. It was found that the acceleration calculated analytically is lower than the computational one. According to the results of the work, it is evident that the greater the number of changes, the greater the estimate, but there are also a decrease in some cases. In addition, the acceleration depends on the number of changes in the matrix linear system of algebraic equations - with increasing the matrix order, the acceleration increases.

*Keywords:* system of linear equations, multiple solution analysis.

Использование плосковых структур позволяет разрабатывать более совершенную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) различного назначения. При их проектировании широко используют квазистатический подход на основе вычисления матрицы электростатической (С) индукции на основе данных о проводниках и диэлектриках сегментированной (дискретизированной) модели исследуемой структуры методом моментов, который предложили R. Hatington, T. Sarkar, A. Djordjevic. Для повышения его эффективности требуется уменьшать вычислительные затраты, особенно при многовариантном анализе. С учетом того, что основные затраты приходится на решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), поэтому совершенствование методов ее решения является актуальным, что подтверждается большим количеством публикаций на данную тематику. Для расчёта матрицы С необходимо решить СЛАУ вида  $S\Sigma = V$ , где S - плотная и квадратная матрица порядка N, V - матрица из задаваемых потенциалов на сегментах моделируемой структуры, а искомая матрица  $\Sigma$  даёт распределение плотности заряда на этих границах. В работе [1] предложен алгоритм многократного решения СЛАУ, основанный на блочном LU-разложении. Однако он применим только при изменении толщины диэлектрического слоя. Для возможности его использования при изменении произвольных параметров структуры предложен алгоритм перенумерации [2].

Цель работы - получение оценок использования перенумерации при многовариантном анализе плосковых структур.

Алгоритм многократного решения СЛАУ, основанный на блочном LU-разложении, позволяет при многократном ( $m$ ) изменении высоты слоя диэлектрика перестраивать матрицу  $S$  не полностью, а только блоки  $B$ ,  $C$  и  $D$  (рис.1).

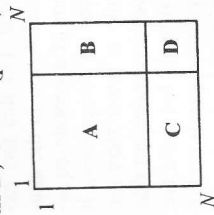


Рис.1. Структура матрицы СЛАУ  $S$  при изменении высоты слоя диэлектрика

Для ясности дальнейшего изложения приведем данный алгоритм.

Алгоритм вычисления  $m$  емкостных матриц.

- 1 Вычислить элементы матрицы  $S_1$  (размера  $N \times N$ )
- 2 Изменить нумерацию границ структуры так, чтобы подобласти, соответствующие изменяющимся строкам и столбцам матрицы  $S_1$ , нумеровались последними
- 3 Вычислить  $A_1 = A_1^{-1}$  (размеры блока  $N_A \times N_A$ )
- 4 Вычислить элементы матрицы воздействия  $V_k$
- 5  $X_0 = A_1 V_0$  (размер блоков  $X_0$  и  $V_0 - N_A \times N_{COND}$ )
- 6 Для  $k$  от 1 до  $m$
- 7  $B_k = A_1 B_k$
- 8  $D_k = D_k - C_k B_k$
- 9  $X_{1k} = V_1 - C_k X_0$  (размер блоков  $X_{1k}$  и  $V_1 - N_D \times N_{COND}$ )
- 10  $\Sigma_{1k} = D_k^{-1} X_{1k}$
- 11  $\Sigma_{0k} = X_0 - B_k \Sigma_{1k}$
- 12 Вычислить элементы емкостной матрицы  $\underline{C}_k$
- 13 Вычислить элементы изменяющихся блоков  $B_{k+1}$ ,  $C_{k+1}$ ,  $D_{k+1}$
- 14 Увеличить  $k$

В табл.1 приведены оценки его арифметической сложности.

Арифметическая сложность алгоритма последовательного LU-разложения состоит из затрат на операции прямого ( $Q_{FW}$ ) и обратного ходов ( $Q_{BW}$ ).

$$Q_{FW} = \frac{4N^3 - 3N^2 - N}{6}, \quad Q_{BW} = 2N^2 - N. \quad (1)$$

Тогда общая сложность последовательного вычисления  $m$  емкостных матриц составляет

$$Q_{LU} = m(Q_{FW} + N_{COND} Q_{BW}). \quad (2)$$

Оценки арифметической сложности шагов алгоритма

№ шага	Арифметическое действие	Арифметическая сложность ( $Q$ )
Однократно выполняемые операции		
3	$A_1 = A_1^{-1}$	$Q_3 = \frac{8}{3} N_A^3 - \frac{3}{2} N_A^2 - \frac{1}{6} N_A$
5	$X_0 = A_1 V_0$	$Q_5 = N_A N_{COND} (2N_A - 1)$
$m$ -кратно выполняемые операции		
7	$B_k = A_1 B_k$	$Q_7 = N_D N_A (2N_A - 1)$
8	$D_k = D_k - C_k B_k$	$Q_8 = 2N_A N_D^2$
9	$X_{1k} = V_1 - C_k X_0$	$Q_9 = 2N_A N_D N_{COND}$
10	$\Sigma_{1k} = D_k^{-1} X_{1k}$	$Q_{10} = \frac{8}{3} N_D^3 + N_D^2 \left( 2N_{COND} - \frac{3}{2} \right) + N_D \left( N_{COND} - \frac{1}{6} \right)$
11	$\Sigma_{0k} = X_0 - B_k \Sigma_{1k}$	$Q_{11} = 2N_A N_D N_{COND}$

При изменении произвольных параметров структур структуры измененные элементы матрицы  $S$  находятся в произвольных местах (рис.2,а). При использовании перенумерации элементы делятся на блоки в зависимости от того, изменяется ли элемент матрицы при многовариантном анализе. Таким образом, элементы матрицы, описывающие часто изменяющиеся сегменты, располагаются в последних строках и столбцах матрицы  $S$  (рис.2,б). В результате становится возможным использование приведенного выше алгоритма, основанного на блочном LU-разложении.

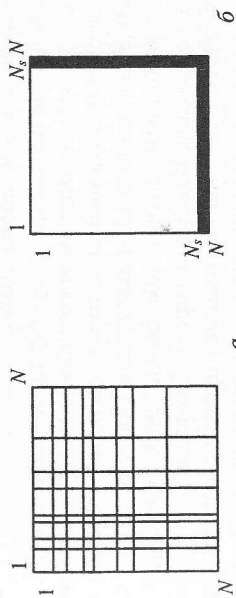


Рис.2. Структура матрицы  $S$ : без перенумерации (а) и после перенумерации (б) (для наглядности чёрным выделены строки и столбцы, содержащие изменяемые элементы)

При перенумерации строится структура данных в виде ассоциативного массива, обозначающего соответствие между «старыми» номерами подынтервалов и «новыми». В ходе построения такой структуры необходимо выполнить обход  $N_g$  отрезков грани, всех сегментов структуры и дополнительно обойти изменяемые сегменты. Таким образом, сложность алгоритма перенумерации вычисляется по выражению (3).

$$Q_{12} = 3N_g + N + N_D. \quad (3)$$

Тогда ускорение за счет использования алгоритмов перенумерации и основанного на блочном LU-разложении относительно использования последовательного LU-разложения выражается следующим выражением:

$$\beta_Q = \frac{Q_{LU}}{Q_{BLU}} = \frac{Q_{LU}}{(Q_3 + Q_5) + m(Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) + Q_{12}} \quad (4)$$

Разработанная реализация алгоритма многовариантного анализа протестирована на примере двух и трехпроводной полосковых линии передачи (рис.3), в системе TALGAT [2].

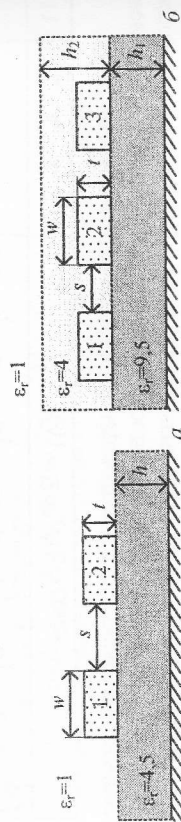


Рис.3. Двух- (а) и трехпроводная (б) полосковые линии передачи (1, 2, 3 - проводники)

Для вычислительного эксперимента использовался персональный компьютер с параметрами: платформа - Intel(R) Core(TM) i7 CPU 970; частота процессора - 3.20 ГГц; объем ОЗУ - 24 Гбайт; число ядер - 8; операционная система - Windows 10x64.

Геометрические параметры структур представлены в [3]. В табл.2 приведены оценки ускорения многократного вычисления матрицы С за счет использования алгоритмов перенумерации элементов матрицы СЛАУ и блочного LU-разложения для ее решения. Сравнение выполнено с исходным алгоритмом вычисления емкостной матрицы, основанным на последовательной версии LU-разложения для решения СЛАУ. Выполняется изменение толщины проводников для структуры 1 ( $N=1100$ ). Вычисления выполнялись при изменении толщины одного (вариант 1), и двух проводников (вариант 2). Количество изменений составляло  $2^k$ . Аналогичные результаты для структуры 2 ( $N = 1700$ ) приведены в табл.3.

Таблица 2  
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы С для двухпроводной полосковой линии передачи

Вариант	k	(N <sub>g</sub> /N)	Аналитические	Вычислительные
1	1		0,69	1,99
	2		0,95	1,95
	3		1,15	1,94
	4		1,30	1,93
	5	0,73	1,38	1,93
	6		1,43	1,93
	7		1,46	1,97
	8		1,47	2,01
	9		1,48	1,93
2	1		0,63	1,98
	2		0,67	2,04
	3		0,70	2,18
	4		0,71	2,18
	5	0,46	0,71	2,14
	6		0,72	2,12
	7		0,72	2,13
	8		0,72	2,25
	9		0,72	2,20

Таблица 3  
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы С для трехпроводной полосковой линии передачи

Вариант	k	(N <sub>g</sub> /N)	Аналитические	Вычислительные
1	1		0,64	2,64
	2		0,99	2,67
	3		1,36	2,71
	4		1,68	2,75
	5	0,82	1,90	2,83
	6		2,03	2,72
	7		2,11	2,78
	8		2,15	2,68
	9		2,17	2,69
2	1		0,72	2,58
	2		0,89	2,78
	3		1,01	2,88
	4		1,08	2,98
	5	0,65	1,12	2,97
	6		1,14	2,99
	7		1,15	2,87
	8		1,16	3,03
	9		1,16	3,03

### Исследование эффекта памяти в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при импульсном переключении

В.Б. Глухенькая, М.А. Соколов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия,  
email: karakusek2009@yandex.ru

### Investigation of the memory effect in thin films of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ under pulsed effect

V.B. Glukhenkaya, M.A. Sokolov

National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Russia,  
email: karakusek2009@yandex.ru

В статье приведены результаты исследований эффекта памяти в тонких пленках материала фазовой памяти  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  при импульсном воздействии. Установлено, что под действием однократных электрических импульсов происходит изменение удельного сопротивления материала. Длительность переключения составляет ~240 нс, а изменение сопротивления составляет два порядка.

*Ключевые слова:* эффект переключения, фазовая память, импульс тока, PCM, GST225.

The article presents the results of investigations of the memory effect in thin films of the phase change memory material  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  under pulsed effect. It was established that under the action of a single electric pulse the material resistance changes. The switching duration is ~240 ns and the change in resistance is two orders of magnitude.

*Keywords:* switching effect, phase memory, current pulse, PCM, GST225

Среди уникальных физико-химических свойств, которыми обладают халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП), особое

Из полученных результатов видно, оценки в целом согласуются, однако их поведение различно. Так, вычислительные оценки выше, чем аналитические во всех случаях. Также можно заметить, что чем больше число количества изменений, тем больше оценка, однако наблюдаются и её понижение в некоторых случаях. Таким образом, полученные оценки показывают, что использование перенумерации позволяет ускорить процесс многократного вычисления матрицы  $S$ . Также можно сделать вывод, что чем больше отношение  $N_s/N$ , тем выше её эффективность.

Математическое моделирование выполнено за счет проекта 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки России, вычислительный эксперимент выполнен за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ГУСУРе.

#### Литература

1. Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного LU-разложения при решении СЛАУ // Инфокоммуникационные технологии. - 2015. - Т. 13, № 4. - С. 375 - 384.
2. Куксенко С.П. Заголоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. - 2015. - № 2(36). - С. 45 - 50.
3. Газизов Руслан Р., Лежнин Е.В., Куксенко С.П. Численные оценки эффективности использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур // Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». - Томск. - 16 - 18 ноября 2016. - Т. 1. - С. 203 - 205.

## Литература

1. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н., Шорина О.С., Эриашивили Н.Д., Юровицкий Ю.Г., Яковлев В.А. Экология и безопасность жизнедеятельности. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. - С. 144.
2. Кольцов В.Б., Кольцова О.В. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. - М.: Юрайт, 2016. - 588 с.
3. ОНД-86. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Госкомгидромет. - Л.: Гидрометеониздат, 1987.
4. Страница законопроекта на официальном сайте Государственной Думы Российской Федерации: [http://asozd2.duma.gov.ru/main.nsf/\(Spravka\)?OpenAgent&RN=690757-6&02](http://asozd2.duma.gov.ru/main.nsf/(Spravka)?OpenAgent&RN=690757-6&02).
5. Ларионов Н.М., Рябышенков А.С. Промышленная экология. - М.: Юрайт, 2016. - 495 с.

## Содержание

<i>Астапович А.В., Яковенко Д.В.</i> Термодинамический подход к оценке опасности и риска в устройствах микроэлектроники.....	3
<i>Аубакиров Р.Р.</i> Численное моделирование индуктивной чрескожной передачи энергии с помощью катушек с квадратными витками.....	8
<i>Газизов Р.Р., Лежнин Е.В., Куксенко С.П.</i> Оценки использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур.....	14
<i>Глухенькая В.Б., Соколов М.А.</i> Исследование эффекта памяти в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ при импульсном переключении.....	21
<i>Емцова И.О., Шкулёно А.С.</i> Материальный и энергетический баланс получения кремния высокой чистоты из трихлорсилана.....	27
<i>Жилинский В.О.</i> Учет влияния погрешностей в решении задачи навигационно-временных определений.....	33
<i>Журбина Н.Н., Изитов Д.А., Фёдорова Ю.О., Герасименко А.Ю.</i> Исследование структурных и биологических особенностей 3D композитов на основе углеродных нанотрубок в матрице бычьего сывороточного альбумина.....	40
<i>Захаров А.И., Рябышенков А.С.</i> Применение эксергетического анализа для оценки энергоэффективности систем кондиционирования воздуха чистых помещений.....	48
<i>Зыблина Ю.С.</i> Сравнительный анализ пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ для фазовой памяти электронно-микроскопическими методами.....	54
<i>Канасев Р.И.</i> Исследование метода определения параметров джиттера, измеренного автоматизированным тестовым оборудованием.....	60
<i>Кимлык М.В.</i> Фльтрация гауссовых шумов на изображении в базе дискретных вейвлет-преобразований с использованием контурной информации.....	66
<i>Косыркин И.Б.</i> Беспроводной микромеханический датчик для измерения давления в вакуумном диапазоне.....	72
<i>Королев М.А., Девликанова С.С.</i> Исследование работы КНИ полевого датчика Холла с повышенной магниточувствительностью.....	80