

УДК 536.21

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ “ТЕПЛОВОЙ ЯЧЕЙКИ”

© 2022 г. О. В. Володина¹, *, А. А. Скворцов¹, Д. Е. Пшонкин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский политехнический университет”, кафедра “Динамика, прочность машин и сопротивление материалов”, Москва, Россия

*E-mail: moosbeere_O@mail.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Исследованы температурные режимы функционирования новой модели “тепловой ячейки”, предназначенной для систем хранения и преобразования информации, реализованной на системе металлических пленок, нанесенных на кремниевую пластину. Представлена имитационная модель нагрева полупроводниковой пластины от температурных полей, создаваемых прямоугольным фрагментом металлизации, при импульсном токовом воздействии. Рассмотрено деформационное поведение металлической пленки при “жестких” условиях эксплуатации “тепловой ячейки”.

DOI: 10.31857/S0367676522110333

ВВЕДЕНИЕ

Продолжающаяся миниатюризация полупроводниковых компонентов ведет к росту уровня плотности джоулевого тепла в металлизации и емкостных токов, которые могут привести к сбоям при передаче информации (взаимное электромагнитное влияние). Кроме того, в широко используемой архитектуре фон Неймана, где блок обработки отделен от памяти, что является так называемым узким местом данной архитектуры, происходят значительные потери энергии из-за передачи данных туда и обратно [1]. Такие ограничения в развитии микроэлектроники, связанные с плотностью компоновки элементов на платах, дают предпосылки для изучения функциональной электроники и создания памяти на тепловых элементах. Тепловая память – это память, которая хранит данные термически, путем поддержания температуры. Тепловая ячейка – это функциональный элемент тепловой памяти. Для записи логической единицы в тепловую ячейку ее необходимо нагреть. Когда температура ячейки памяти вернется к исходному значению, будет записан логический 0.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для формирования тепловой ячейки памяти использовалась разработанная ранее структура – система металлизации – тонкая пленка металла (Al), нанесенная на поверхность полупроводника

(Si) [2]. Схемотехническое изображение структуры представлено на рис. 1а, здесь ширина дорожки металлизации 75 мкм, длина – $4 \cdot 10^3$ мкм. Толщина напыленной пленки алюминия составляет 2–3 мкм. Длина кремниевого основания структуры составляет 10^4 мкм, ширина $5 \cdot 10^3$ мкм. Дорожка, проходящая от контакта I до I, предназначена для переноса импульса тока в прямом и обратном направлениях. Контакты от 1 до 12 используются для регистрации сигнала напряжения с различных участков токопроводящей дорожки [3, 4]. Электрофизическая установка, с помощью которой наблюдали эффект тепловой памяти структуры, показана на рис. 1б. Здесь структура приклеена к кремниевому основанию, к которому припаяны провода для пропускания токового импульса.

Использование систем тонких металлических пленок, нанесенных на поверхность полупроводника как элемента тепловой памяти, обосновано тем, что подобные резистивные коммутационные системы являются важными элементами в структурах микроэлектроники [5].

Экспериментальное исследование изменения температуры нагреваемой дорожки металлизации, необходимое для определения предельно допустимых параметров прямоугольного импульса тока, проводилось на импульсной установке. Температуру тестовой дорожки определяли по падению напряжения $U(t)$, как в процессе прохождения токового импульса, так и в промежутках между импульсами тока (см. рис. 4). К сожа-

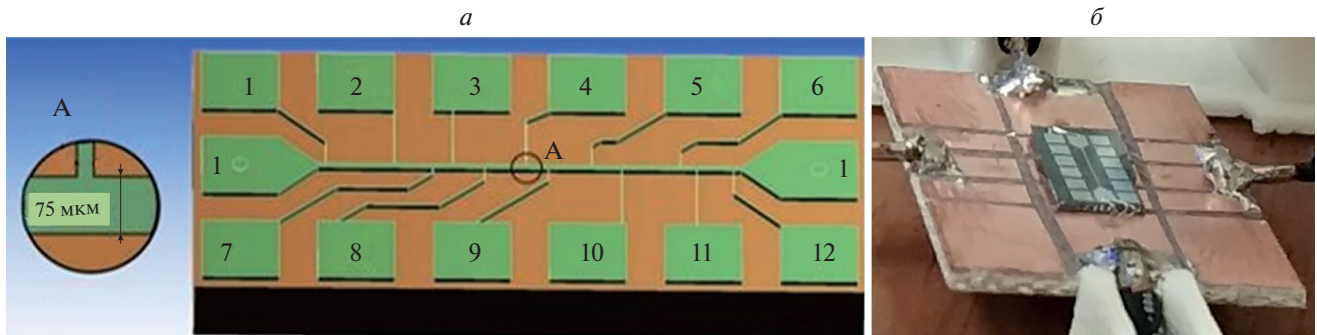


Рис. 1. Внутреннее устройство ячейки тепловой памяти. Схематическое представление структуры (а). Электрофизическая установка (б).

лению, методика определения температурных режимов по временным зависимостям потенциала $U(t)$ не позволяет измерять $T(t)$ после отключения токового воздействия. Однако можно произвести качественную оценку скорости охлаждения металлизации, изучая динамику нагрева дорожки при повторном пропускании импульса тока меньшей амплитуды через еще не остывшую структуру [6].

Экспериментальное исследование деградационных процессов проводилось на тестовых структурах при увеличении амплитуды прямоугольного токового импульса $j > 6 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительности $t > 500$ мкс [7].

О температурных изменениях рассматриваемых структур судили по осциллограммам включения [8]. На рис. 4б представлены типичные результаты этих исследований.

Соотношение амплитуд импульсов подбиралось экспериментально так, чтобы избежать последующего накопления тепла и перегрева структуры [7, 9, 10]. Процесс перегрева наглядно изображен на рис. 5а.

Резкое увеличение падения напряжения на структуре U при $t = 900$ мкс связано с началом оплавления как алюминиевой пленки, так и на границе фаз алюминий–кремний (Al–Si). Увеличение удельного сопротивления расплава на основе алюминия приводит к наблюдаемым изменениям сигнала $U(t)$. Экспериментальное подтверждение теплового разрушения структуры приведены на рис. 5б. Активное тепловыделение в пленке способствовало ее оплавлению (и кристаллизации после отключения импульса, см. 1 на рис. 5б), а также взрывному характеру разрушений (2 на рис. 5б), связанному с плохой адгезией пленки к подложке [7].

Наблюдаемые разрушения структуры произошли после прохождения через нее одиночного

прямоугольного импульса тока амплитудой $j_1 = 8 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью $t = 500$ мкс [7].

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА

Тепловые поля $T(r, \tau)$ в полупроводниковой пластине, нагреваемой слоем металлизации, напыленном на пластину, определяются процессами нестационарной теплопроводности и описываются уравнением теплопроводности [6]:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \Delta T(r, \tau), \quad (1)$$

где r – радиус-вектор точки наблюдения, τ – время, $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности пластины. Здесь λ – теплопроводность, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность кремния [8]. Такие задачи нестационарной теплопроводности (теплопередачи) в твердом теле, а также задачи нестационарного теплообмена позволяет решать расчетный модуль DesignSimulation (DS) на платформе ANSYS Workbench [11].

Модель кремниевой пластины с напылением пленки металлизации (см. рис. 2) разработана с

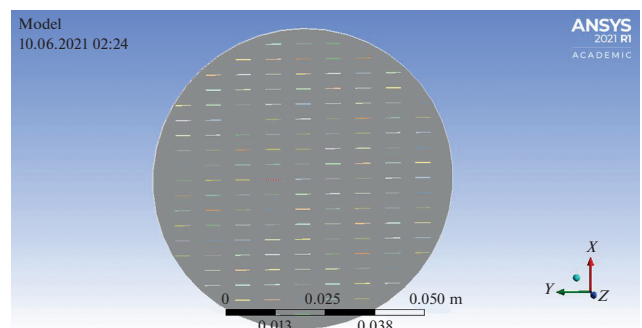


Рис. 2. Модель кремниевой пластины с напылением пленки металлизации в расчетном модуле DesignSimulation (DS) на платформе ANSYS Workbench. Пленка металлизации состоит из 143 алюминиевых дорожек.

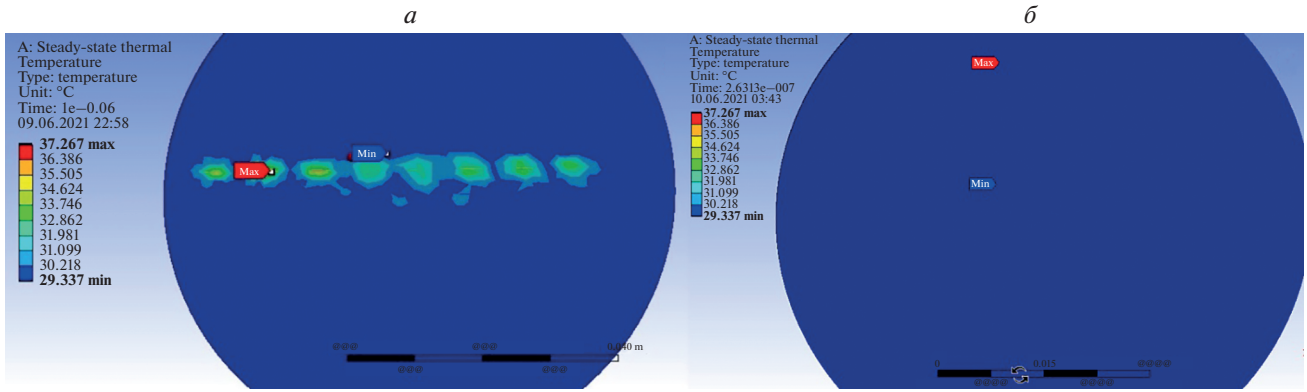


Рис. 3. Решение задачи теплообмена между 8 алюминиевыми дорожками и кремниевой подложкой в модуле Ansys Steady-State Thermal (а). Оценка равновесного состояния системы при постоянных тепловых нагрузках и условиях окружающей среды (б).

использованием программного комплекса SolidWorks и загружена в расчетный модуль DS. Сборка геометрической модели сохранена с расширением SAT. Данная модель имеет следующие размеры: диаметр пластины 76 мм, толщина 1мм. Алюминиевые дорожки, представляющие напы-

ленную систему металлизации, смоделированы со следующими размерными характеристиками: ширина 75 мкм, длина 3.8 мм, толщина 3 мкм.

В модуле работы с базой данных материалов Engineering Data произведена настройка температурно-зависимых свойств материала. Для пластины

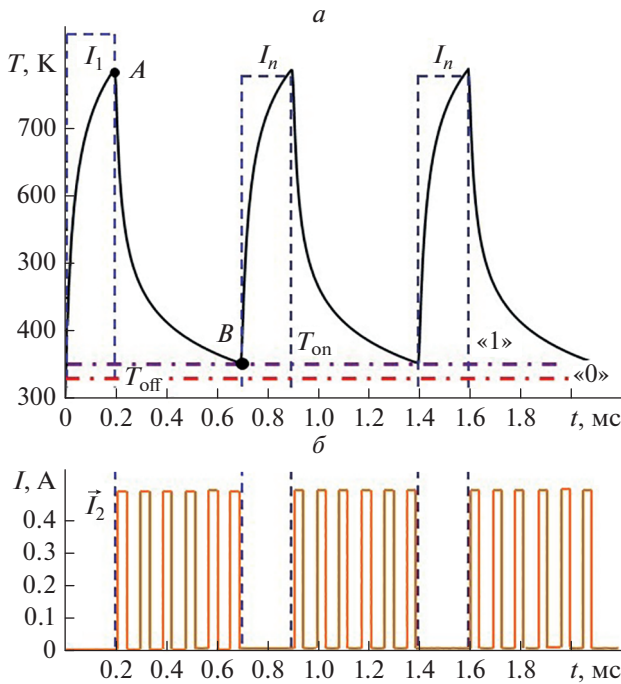


Рис. 4. Динамика температуры области тестовой структуры системы кремний–алюминий, при последовательном воздействии токовыми импульсами (пунктир) амплитудой $I_n = 7.5 \text{ A}$ ($j_n = 5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$) (а). Толщина металлической пленки $h_1 = 2 \text{ мкм}$. Длительность импульсов – 200 мкс. Форма последовательности токовых импульсов для контроля температурных режимов системы (б).

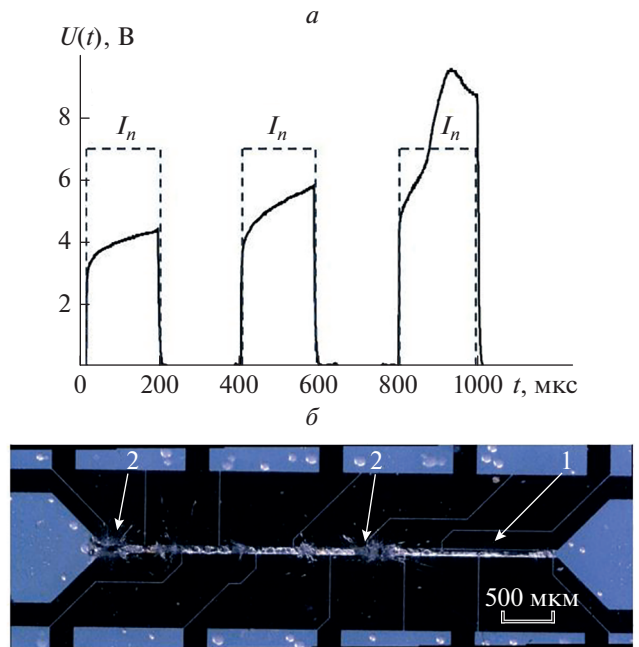


Рис. 5. Форма осциллограмм при последовательном прохождении прямоугольных импульсов тока амплитудой $I_n = 9.5 \text{ A}$ ($j = 6.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$), длительностью $\tau = 200 \text{ мкс}$. Пунктир – форма импульсов тока, проходящих через дорожку металлизации (а). Толщина металлической пленки $h_1 = 2 \text{ мкм}$. Изображение разрушения области структуры алюминий–кремний после прохождения одиночного токового импульса прямоугольной формы $I_1 = 15 \text{ A}$ ($j_1 = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$) и длительностью $\tau = 500 \text{ мкс}$ (б).

Таблица 1. Физические параметры кремния (Silicon)

Кремний	
Плотность	2330.0 кг/м ³
Коэффициент температурного расширения	
Эталонная температура нулевой тепловой деформации	22.000 °C
Изотропная теплопроводность	124.00 Вт/м · °C
Удельная теплоемкость при постоянном давлении	702.00 Дж/кг · °C
Изотропное удельное сопротивление	10 ⁻⁴ Ом · м
Изотропная относительная проницаемость	1.0000

выбран полупроводниковый материал — кремний, физические параметры которого приведены в табл. 1. Материалом для дорожек выбран алюминиевый сплав, основные физические параметры данного материала: плотность — 2713.0 кг/м³, изотропная теплопроводность — 155.30 Вт/м · °C, изотропный секущий коэффициент теплового расширения — $2.278 \cdot 10^{-5}$ 1/°C.

Сгенерирована сетка конечных элементов с количеством узлов 32872 и элементов 2870. В модуле Mechanical созданы 143 контактных региона по количеству алюминиевых дорожек. На поверхности объекта заданы 8 тепловых потоков, для демонстрации сохранения байта данных, мощность каждого равна 5.5 Вт. На внешней стенке пластины установлена постоянная температура, равная 30°C. Общее время воздействия тепловых потоков равно 1 мс. Тепловой поток в контакте передается между поверхностями посредством контактных элементов по нормали к поверхности контакта. За установленное время дорожка нагревается до температуры 37.267°C. Распространение тепла по поверхности кремниевой подложки показано на рис. 3а. В результате решения задачи имитационного моделирования теплопроводности выявлено, что тепловой поток не доходит до внешней стенки полупроводниковой подложки за время воздействия теплового потока, что видно на рис. 3б. Следующим шагом в работе с имитационной моделью будет расчет скорости остывания дорожки в условиях вынужденной конвекции, применяемой для охлаждения устройства

оперативной памяти, для решения задачи по определению частоты регенерации ячеек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ температурных режимов функционирования “тепловой” ячейки показал, что механические напряжения термоупругой природы, возникающие в металлической пленке во время действия токового импульса, достигают критических значений, приводящих к деформационным изменениям пленки вплоть до появления расплавленного участка и обрыву токопроводящей линии [7].

Локальное изменение геометрии при оплавлении пленки алюминия, выраженное в том, что на части участков расплавленной пленки площадь поперечного сечения растет, а на части участков данная площадь уменьшается, привело к сильным тепловым градиентам во время протекания тока на границах таких участков и способствовало разрушению целостности дорожки.

Работа тепловой ячейки памяти связана со способностью материала быстро нагреваться без разрушения и быстро отдавать тепло для получения максимального количества тактов обработки данных за 1 с. Разрушение пленки алюминия приводит к утрате пленкой данных качеств и выходу ячейки памяти из строя.

В статье описана экспериментальная возможность построения тепловой ячейки памяти на данной технологии. Рассмотренная технология

предполагает создание медленной динамической ячейки памяти, что в современном мире высокочастотных устройств не найдет применения, но доказанная возможность функционирования элементов памяти при управлении тепловыми потоками в последних позволяет проводить дальнейшие исследования и разработки более быстрых технологий. Целью дальнейшей работы и экспериментов является создание устройства для управления передачей электрической и распределением тепловой энергии в части объема материала памяти в “тепловой ячейке” памяти. Исследование также нацелено на изобретение средства управления передачей тепловой энергии в определенные (адресные) “тепловые ячейки” памяти и из них.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01373).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hadamek T., Fiorentini S., Bendra M.* // Solid-State Electron. 2022. V. 193. Art. No. 108269.
2. *Skvortsov A.A., Glinskiy V.V., Zuev S.M. et al.* // Microelectron. Intern. 2016. V. 33. No. 2. P. 102.
3. *Skvortsov P.A., Koryachko M.V., Luk'yanov M.N. et al.* // J. Mater. Engin. Perform. 2020. V. 29. No. 7. P. 4390.
4. *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V.* // Key Engin. Mater. 2018. V. 771. P. 118.
5. *Bermejo R., Krautgasser C., Deluca M. et al.* // J. Microelectron. Electron. Pack. 2016. V. 1. No. 1. P. 17.
6. *Литвиненко О.В.* Исследование термоакустических эффектов в кремниевых пластинах. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ульяновск: Ульяновский гос. ун-т, 2003. 126 с.
7. *Скворцов А.А., Пшонкин Д.Е., Володина О.В.* // Сб. тез. 9 Междунар. конф. “Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов” (Москва, 2021). С. 154.
8. *Скворцов А.А.* Транспортные процессы в полупроводниках с участием линейных и объемных дефектов. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Ульяновск: Ульяновский гос. ун-т, 2004. 358 с.
9. *Nguyen T.A., Joubert P.-Y., Lefebvre S. et al.* // Microelectron. Reliab. 2011. V. 51. No. 6. P. 1127.
10. *Ambrogio S., Magyari-Köpe B., Onofrio N. et al.* // J. Electroceramics. 2017. V. 39. No. 1–4. P. 39.
11. <https://www.ansysadvantage.ru/heat-exchange-problems-in-ansys-workbench>.

Temperature modes of the ‘heat cell’ functioning

O. V. Volodina^{a,*}, A. A. Skvortsov^a, D. E. Pshonkin^a

^a*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

**e-mail: moosbeere_O@mail.ru*

We studied the temperature modes of the “heat cell”—functional elements of thermal memory implemented on a system of metal films deposited on a silicon wafer. A mathematical analysis of the temperature fields in a semiconductor wafer, created by a rectangular piece of metallization, under a pulsed current action is carried out. Experimental results are presented that clearly depict the process of deformation of a metal film, leading to the destruction of the structure.