

Логические вентили на основе элементов тепловой памяти

О.В. Володина
ФГАОУ высшего образования
«Московский политехнический
университет»
Москва, Россия
moosbeere_O@mail.ru

А.А. Скворцов
ФГАОУ высшего образования
«Московский политехнический
университет»
Москва, Россия
skvortsovaa2009@yandex.ru

В.К. Николаев
ФГАОУ высшего образования
«Московский политехнический
университет»
Москва, Россия
nvk64@list.ru

Аннотация — В статье анализируется возможность применения элементов тепловой памяти для создания системы, позволяющей производить вычисления в памяти. Подобная вычислительная система строится на устройствах, которые используются одновременно для хранения входных данных, выполнения логической операции и сохранения выходного результата. Авторы приходят к выводу, что подобное поведение возможно эмулировать используя элементы тепловой памяти с диэлектрическим (SiO_2) слоем теплоизоляции. Особое внимание уделено логическим элементам вычислительных систем и их реализации на основе элементов тепловой памяти. Имитационное моделирование работы подобных элементов проведено на платформе ANSYS Workbench с использованием модуля Transient Thermal для нестационарных тепловых расчетов. На основе моделирования установлена возможность создания двух основных логических элементов «AND» и «OR».

Ключевые слова — элемент тепловой памяти, логический элемент, вычисления в памяти, распространение теплового поля.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задачи искусственного интеллекта, такие как распознавание образов и речи, прогнозирования, принятия решений и т.д. с каждым годом требуют увеличения производительности вычислительных систем. В последние годы исследования направлены на развитие новой архитектуры вычислений – вычислений в памяти – аналогичной когнитивным процессам человеческого мозга. Вычисления в памяти – многообещающий подход, в котором элементы аналоговой памяти, организованные в блоке вычислительной памяти, используются как для обработки, так и для хранения данных [1]. В этой статье мы рассматриваем применение элементов тепловой памяти, представленной нами в работах [2-4], в качестве вычислительной единицы памяти. Тепловая память обладает динамическим диапазоном степени нагрева, нелинейностью и асимметричностью отклика на нагрев и изменчивостью устройства [2]. Свойство изменчивости устройства, которое появляется из-за термодинамического воздействия элементов друг на друга принято нивелировать с помощью слоя диэлектрической теплоизоляции. Рассмотрим логику работы элемента тепловой памяти и представим геометрическую модель устройства, полученного в результате формирования диэлектрического слоя теплоизоляции.

II. ЭЛЕМЕНТ ТЕПЛОВОЙ ПАМЯТИ

Элемент тепловой памяти представляет собой структуру, основанную на системе металлизации – тонкая пленка металла (Al), нанесенная на поверхность

полупроводника (Si). Логика работы элемента тепловой памяти основана на динамическом изменении температуры проводящей дорожки алюминия (Al), нанесенной на кремний (Si). Теплоотвод при этом осуществляется преимущественно через контакт с кремниевой пластиной. Распространение теплового поля происходит не только вглубь кремниевой пластины, но и по её ширине вокруг источника тепла. Что приводит к влиянию на соседние элементы памяти и изменению их термодинамического состояния. Для решения данной проблемы предложен метод создания диэлектрической (SiO_2) изоляции внутри кремния в форме карманов.

Для исследования влияния карманов теплоизоляции на распространение теплового поля вокруг элемента тепловой памяти проведено моделирование изолированных таким образом элементов тепловой памяти на платформе ANSYS Workbench с расчетом в модуле Steady-State Thermal.

III. ЛОГИЧЕСКИЕ ВЕНТИЛИ AND И OR

Геометрия структуры (рис.1) логических элементов включает три элемента тепловой памяти, два из которых используются для хранения входных данных и один предназначен для проведения операции вычисления и сохранения результата, назовем его весовой элемент по аналогии с весом синапса в нейроморфных устройствах [5]. Элементы памяти, принимающие входные данные, расположены параллельно друг другу и разделены слоем диэлектрика для ограничения распространения тепла и уменьшения вероятности изменения термодинамического состояния друг друга. Третий элемент памяти расположен под данным диэлектрическим слоем.

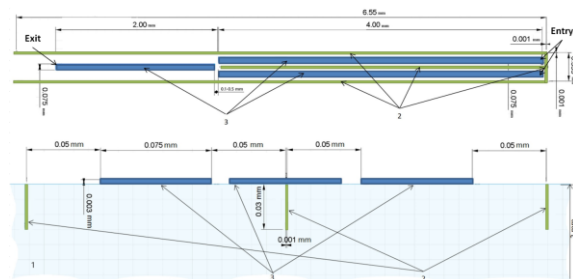


Рис. 1. Геометрия структуры: 1 – кремниевая пластина; 2 – металлические дорожки для нагрева структуры; 3 – слой диэлектрика

Входные данные могут принимать значение логических «0» или «1». Логика работы логического элемента «OR» здесь проявляется как увеличение значения температуры весового элемента до уровня логической «1» за счет распространения теплового поля от нагретых элементов тепловой памяти с входными данными. Причем мощность распространения теплового

поля должна быть достаточна для нагрева весового элемента тепловой памяти даже в случае поступления логической «1» только на один элемент с входными данными. Известно, что мощность теплового поля уменьшается по мере удаления от горячего тела. Поэтому логика работы логического элемента «OR» на базе элементов тепловой памяти реализуется за счет минимального расстояния между весовым элементом тепловой памяти и элементами с входными данными. На рис. 1 данное расстояние отмечено в диапазоне от 0,1 мм до 0,5 мм. Расстояние в 0,1 мм соответствует логическому элементу «OR», а расстояние 0,5 мм – логическому элементу «AND».

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 2. показано распространение теплового поля вокруг одного нагретого до температуры 25,767 °C элемента памяти. При этом весовой элемент памяти расположен на расстоянии 0,1 мм и нагревается до 23,65 °C, что соответствует увеличению температуры на два градуса.

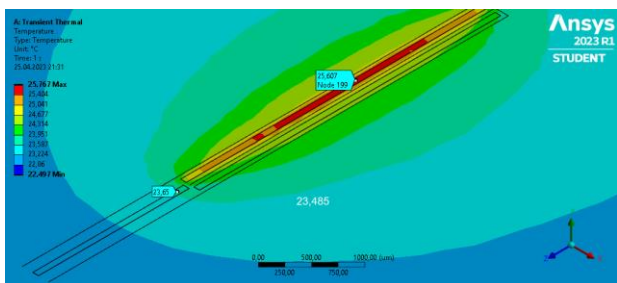


Рис. 2. Распространение теплового поля вокруг одного нагретого элемента памяти

Такое увеличение температуры в соответствии с материалом ранее опубликованной работы авторов [2] приводит к записи на элемент памяти информационного состояния логической «1». Полученный результат характеризует функционирование логического элемента «OR», значение логической «1» на любом из входов даст логическую единицу на выходе. Также как и логическая «1» на выходе появится в случае двух входных сигналов равных логической «1».

Также расчеты показали, что при расстоянии до весового элемента 0,5 мм его температура достигнет значения логической «1» только при нагреве одновременно двух входных элементов памяти. Результат представлен на рис. 3.

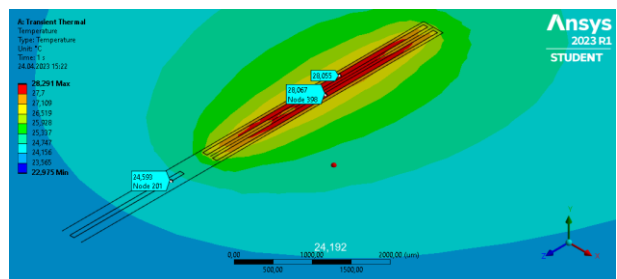


Рис. 3. Распространение теплового поля вокруг двух одновременно нагретых элементов памяти с входными данными

Такое поведение характеризует функционирование логического элемента «AND», на выходе будет значение логической «1» только в случае поступления логической «1» на оба входных элемента памяти.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования определено количество элементов тепловой памяти в устройстве,

позволяющем проводить вычисления в памяти. Устройство должно состоять из трех оговоренных элементов с расстоянием между входными элементами и весовым элементом от 0,1 мм до 0,5 мм. Данный диапазон может быть изменен пропорционально изменению геометрии самих элементов. А также необходимо внедрение диэлектрического слоя теплоизоляции в соответствии с геометрией приведенной на рис. 1 для уменьшения теплового воздействия элементов друг на друга.

Масштабирование элементов тепловой памяти предполагает нанесение на кремниевую пластину матрицы из алюминиевых дорожек. Но создание изоляционных карманов в кремниевой пластине трудоемко, поэтому на основе полученных логических вентилей планируем разработать полный сумматор.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания проекта Минобрнауки России (проект FZRR-2023-0009).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Le Gallo, M. Mixed-precision in-memory computing / M. Le Gallo, A. Sebastian, R. Mathis, M. Manica et al. // Nature Electronics. – 2018. – Vol. 1. – P. 246-253.
- [2] Volodina, O.V. Functioning of the Thermal Memory Cell / O.V. Volodina, D.O. Varlamov, A.A. Skvortsov // Springer Nature Switzerland. – 2022. – Vol. 1703. – P. 42-56.
- [3] Skvortsov, A.A. Metallization system as a part of thermal memory / A.A. Skvortsov, D.E. Pshonkin, O.V. Volodina, V.K. Nikolaev // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(5). – P. e15797.
- [4] Volodina, O.V. Temperature Modes of Thermal Cell Functioning / O.V. Volodina, A.A. Skvortsov, D.E. Pshonkin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Vol. 86. – P. 1270-1274.
- [5] Lee, J.-J. Integrated neuron circuit for implementing neuromorphic system with synaptic device / J.-J. Lee, J. Park, M.-W. Kwon et al. // Solid-State Electronics. – 2018. – Vol. 140. – P. 34-40.