

лагаются в трехмерном пространстве-сцене, а также задаются физические и оптические свойства их поверхностей и их цвет. Затем определяется, где будут расположены источники света и наблюдатель. И, наконец, с помощью программы трассировки лучей создается математическая модель сцены, света и наблюдателя, с помощью которой вычисляется цвет каждого пикселя графического изображения, получаемого на экране дисплея.

Данная задача была решена с помощью системы DCS. Ниже приведено время эксперимента в зависимости от числа используемых клиентов:

Число клиентов	Время расчёта
1 клиент	23:35
2 клиента	12:45
3 клиента	08:14
4 клиента	06:08

Для экспериментов использовались компьютеры: Intel Core 2 Quad Q9550 2.83 Ghz, 2.5 Gb RAM, Windows XP SP3.

М.В. Гиркин, Д.И. Крыжановский, М.А. Фёдоров

Волгоградский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ RRAM НА КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Как известно, суммарное время вычислений, осуществляемых одним последовательным вычислительным устройством, складывается из времени, непосредственно затрачиваемого на выполнение арифметических операций, и времени, затрачиваемого на операции с памятью. Развитие вычислительной техники, наблюдающееся в последние годы и сопровождающееся широким внедрением многоядерных процессоров и других параллельных систем, позволило значительно увеличить скорость вычислений, снизив как среднее время выполнения отдельных

элементарных операций, так и время выполнения арифметических вычислений в целом. Однако скорость обмена данными с памятью по-прежнему остаётся относительно низкой по сравнению со скоростью собственно вычислений, что зачастую снижает эффективность работы высокопроизводительных систем. Кроме того, традиционные типы памяти, основанные на сохранении заряда, практически исчерпали свои технологические ресурсы и достигли физического предела масштабирования и скорости обмена данными [7, 8]. В связи с этим разработка новых типов памяти, основанных на иных физических принципах, становится всё более актуальной.

По мнению ряда исследователей наиболее перспективными являются типы памяти, основанные на явлении резистивного переключения: CBRAM (память с мостом проводимости – *Conductive Bridge* – между двумя электродами), PCRAM (память, основанная на изменении сопротивления между двумя фазами – *Phase Change* – халькогенида) и RRAM (резистивная – *Resistive* – память). Эти типы памяти обладают наиболее простой структурой среди всех предложенных на настоящий момент вариантов энергонезависимой памяти (проводник – диэлектрик – проводник) и, кроме того, демонстрируют хорошую масштабируемость. Кроме того, RRAM характеризуется низким рабочим напряжением (< 2 В), малым временем переключения (< 10 нс), высокой плотностью и большим числом циклов перезаписи.

В недавних исследованиях был предложено несколько механизмов физических процессов, объясняющих работу резистивной памяти:

- модель, основанная на захвате носителей заряда [3];
- электрохимическая миграция вакансий кислорода [15];
- электрохимическая миграция ионов кислорода [10];
- ряд других моделей [4, 5, 6, 13, 14].

Однако, несмотря на значительные усилия, удовлетворительное фундаментальное понимание механизма резистивного переключения в RRAM по-прежнему отсутствует, что задерживает дальнейшее развитие данного типа памяти.

Ниже в работе представлена стохастическая модель механизма резистивного переключения, основанная на переходах электронов между вакансиями кислорода вдоль канала проводимости в слое оксида. Модель была предложена и протестирована в последовательном исполнении сотрудниками Института микроэлектроники Венского технического университета. Далее описаны численные улучшения, введённые в существующую реализацию модели, а также результаты её распараллеливания, выполненные сотрудниками факультета электроники и вычислительной техники Волгоградского государственного технического университета.

Описание модели. В предложенной модели [9] возникновение канала проводимости объясняется за счёт переходов электронов и вакансий кислорода. Рассматривается пять различных элементарных событий:

- 1) формирование вакансий кислорода за счёт смещения ионов из узлов кристаллической решётки;
- 2) аннигиляция вакансий в результате возвращения ионов кислорода в узлы кристаллической решётки;
- 3) переход электрона между двумя вакансиями;
- 4) переход электрона от вакансии к электроду;
- 5) переход электрона от электрода к вакансии.

В текущей реализации используется 41 входной параметр модели, задающие условия протекания процесса и задающиеся пользователем. В рамках настоящего проекта данная модель была сначала повторена, а затем распараллелена с использованием технологии MPI и протестирована на кластере Волгоградского технического университета. Чтобы избежать больших накладных расходов, было решено отказаться от распараллеливания вычислений внутри одного эксперимента. В данном случае различные параллельные потоки соответствуют отдельным перезапускам одного и того же эксперимента и разным наборам значений входных параметров модели. После отладки параллельной реализации модели были получены результаты, аналогичные представленным в работе [9].

Параллельная генерация случайных чисел. Для поддержки моделирования по методу Монте-Карло был реализован алгоритм генерации случайных чисел, предложенный Лекьюе [12], с периодом $\approx 2,3 \cdot 10^{18}$; для генерации нормально распределённых величин было использовано преобразование Бокса-Мюллера [12]. Чтобы обеспечить более высокую масштабируемость программного кода, генераторы случайных чисел были реализованы в рамках объектно ориентированной парадигмы. Структура объектной модели генераторов и преобразователей для заданных распределений приведена на рисунке.

Для параллельной генерации случайных чисел была использована комбинация репликационной (*replicated*) и распределённой древовидной (*distributed random tree*) схем. В главном потоке запускается последовательный генератор, выходные значения которого являются начальными значениями (*seed*) для остальных генераторов, функционирующих уже в параллельно исполняемых потоках. Именно выходные значения этих генераторов используются для дальнейшего розыгрыша случайных событий по методу Монте-Карло.

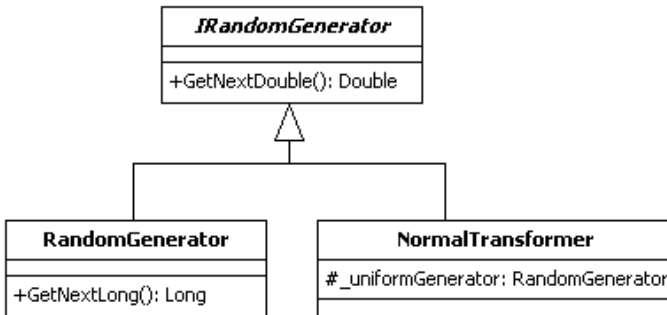


Рис. Структура объектной модели генераторов случайных чисел

Одно из требований, которому должны удовлетворять случайные величины, генерируемые в параллельных потоках, отсутствие корреляции между ними. Была поставлена серия экспериментов, в ходе которых генерировалось 50 последовательностей (каж-

дая в своём потоке) из 100 000 случайных чисел. По результатам экспериментов была составлена корреляционная матрица, элементы которой рассчитывались по формуле [1]

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где N – длина последовательностей случайных чисел, x_i и y_i – элементы двух последовательностей, проверяемых на наличие корреляции, $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения проверяемых последовательностей (так как генерировались равномерно распределённые величины на полуинтервале $[0;1)$, средние значения были приблизительно равны 0,5). Во всех экспериментах элементы корреляционной матрицы принимали значения на отрезке $[0; 0,02]$ по абсолютному значению, что свидетельствовало об отсутствии статистически значимой корреляции между отдельными генераторами случайных чисел.

Чтобы получить более достоверное подтверждение этого факта, сгенерированные последовательности были также проверены и по критерию Фишера. Для всех пар последовательностей по формулам регрессионного анализа были построены линейные модели вида $y = a_0 + a_1x$, и во всех случаях они оказались неадекватны [2]. Таким образом, было получено дополнительное подтверждение отсутствия статистически значимой корреляции между последовательностями случайных чисел и пригодности.

План дальнейшего исследования. В настоящий момент описанное выше исследование находится на стадии усложнения модели и удаления из неё искусственных упрощений и допущений. Именно на данном этапе в полной мере скажутся преимущества параллельной реализации модели. Предлагаются следующие усовершенствования в модели:

- заменить 2D-моделирование на 3D;
- вместо одинакового расстояния между узлами кристаллической решётки ввести распределение расстояний;

- вместо жёстко заданного направления движения электронов ввести вероятностное распределение возможных направлений;

- ряд других усложнений.

По замыслу авторов это позволит получить более адекватную модель и добиться более глубокого понимания физической природы процессов, управляющих работой RRAM.

Список литературы

1. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

2. Петрович М.Л. Регрессионный анализ и его математическое обеспечение на ЕС ЭВМ: практ. руководство. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 199 с.

3. Fujii T., Kawasaki M., Sawa A., Akoh H., Kawazoe Y., Tokura Y. Appl. Phys. Lett. Vol. 86. No. 1, art. No. 012107, 2005.

4. Gao B., Sun B., Zhang H., Liu L., Liu X., Han R., Kang J., Yu B. IEEE Electron Device Lett. Vol. 30. No. 12. P. 1326–1328, 2009.

5. Kim S., Choi Y.K. IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 56. No. 12. P. 3049–3054, 2009.

6. Kinoshita K., Tamura T., Aso H., Noshiro H., Yoshida C., Aoki M., Sugiyama Y., Tanaka H. IEEE Non-Volatile Semicond. Memory Workshop, p. 84,85, 2006.

7. Kryder M.H., Kim C.S. IEEE Trans. Magn. Vol. 45. No. 10. P. 3406–3413, 2009.

8. Lee B.C., Zhou P., Yang J., Zhang Y.T., Zhao B., Ipek E., Mutlu O., Burger D. IEEE Micro. Vol. 30. No. 1. P. 131–141, 2010.

9. Makarov A., Sverdlov V., Selberherr S. First Principles Modeling of Bipolar Resistive Switching in Metal-Oxide Based Memory.

10. Nishi Y., Jameson J.R. Dev. Res. Conf. P. 271–274, 2008.

11. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. – Second Edition, Cambridge University Press.

12. Robert C.P., Casella G. Introducing Monte Carlo Methods with R, Use R. – Springer Science + Business Media.

13. Rozenberg M.J., Inoue I.H., Sanchez M.J. Phys. Rev. Lett. Vol. 92. No. 17. P. 178302-1, 2004.

14. Russo U., Ielmini D., Cagli C., Lacaita A.L., Spiga S., Wiemer C., Perego M., Fanciulli M. IEDM Tech. Dig. P. 775–778, 2007.

15. Wu S.X., Xu L.M., Xing X.J. Appl. Phys. Lett. Vol. 93. No. 4. P. 043502/1-3, 2008.

В.В. Горбик, А.В. Панюков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

ТЕХНИКА РЕАЛИЗАЦИИ СИМПЛЕКС-МЕТОДА НА КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Применение симплекс-метода для практических задач линейного программирования остается вне конкуренции, несмотря на появившиеся полиномиальные алгоритмы [1]. В настоящее время используются две техники реализации симплекс-метода: 1)~метод симплекс-таблиц; 2)~метод обратной матрицы (модифицированный симплекс-метод).

Далее особенности данных методов будем рассматривать на примере задачи линейного программирования

$$\max \{c^T x : Ax = b \geq 0, x \geq 0; c, x \in \mathbf{R}^n; b \in \mathbf{R}^m\}.$$

Метод симплекс-таблиц итерации \$k\$ пересчитывает симплекс-таблицу

$$S^{(k)} = \frac{Z^{(k)} = c_{B(k)}^T B(k)^{-1} b}{X_{B(k)} = B(k)^{-1} b} \left| \frac{z^{(k)} = -c^T + c_{B(k)}^T B(k)^{-1} A}{B(k)^{-1} A} \right.,$$

где $B(k)$ – базисная матрица, содержащая все относящиеся к базисным переменным k -й итерации столбцы матрицы A (базисные столбцы); $c_{B(k)}$ – вектор коэффициентов целевой функ-