

## **Ускоренный метод численной оценки вероятности возникновения глубоких ошибок считывания в устройствах STT-MRAM**

А. П. Михайлов<sup>1</sup>, А. Д. Белановский<sup>1</sup>, Д. Р. Лещинер<sup>1</sup>, А. В. Хвальковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Логическое состояние (0/1) ячейки магнитной памяти, переключаемой с помощью эффекта переноса спина STT-MRAM (spin-transfer torque magnetic random access memory), считывается путем пропускания небольшого тока через ячейку. Этот ток может привести к непреднамеренному переключению ячеек памяти. Этот процесс имеет название ошибок чтения (read disturb) и его вероятность принято называть read disturb rate (RDR, частота возникновения ошибок считывания). Зависимость RDR от управляющего напряжения часто используется для оценки длительности хранения информации [1].

С этой целью крайне важно измерять ошибки считывания с как можно более низкой вероятностью. Численные и аналитические оценки RDR были выполнены рядом авторов, например [2,3]. Численная оценка делается путем расчета стохастической динамики большого числа ячеек памяти и повторения этого вычисления столько раз, сколько требуется для обнаружения по крайней мере несколько событий переключения при каждом заданном токе. Этот расчет методом "грубой силы" может потребовать значительных вычислительных ресурсов. В нашей работе мы предлагаем метод, который помогает ускорить этот расчет. Предлагаемый нами метод заключается в том, чтобы, прежде всего, найти термически равновесное распределение при нулевом токе. Далее необходимо провести расчет вероятности переключения ячеек памяти в зависимости от начального угла наклона намагниченности к легкой оси и прошедшего времени; в этом моделировании мы рассчитываем динамику большого количества ячеек с изначально установленным углом наклона вектора намагниченности к легкой оси. Прогноз RDR основан на свертке этих двух результатов моделирования. Как оказалось, этот метод позволяет получить достаточно точный прогноз RDR даже для очень глубоких ошибок (т.е. ошибок с очень малой вероятностью, менее  $1e-7$ ) при использовании умеренных вычислительных мощностей. Наши расчеты выполнены с использованием стохастического моделирования методом макроспина на GPU кластере нашей лаборатории, содержащим 16 карт NVidia GTX 780 Ti. Для расчета использовался разработанный в нашей лаборатории программный код, подобный реализованному в работе [3].

## Литература

- [1] *Khvalkovskiy, A. V., et al.* "Basic principles of STT-MRAM cell operation in memory arrays. - *Journal of Physics D: Applied Physics* 46.7 (2013): 74001-74020.
- [2] *Butler, W. H., et al.* Switching distributions for perpendicular spin-torque devices within the macrospin approximation. - *Magnetics, IEEE Transactions on* 48.12 (2012): 4684-4700.
- [3] *Pinna, D., et al.* Thermally assisted spin-transfer torque magnetization reversal in uniaxial nanomagnets. - *Applied Physics Letters* 101.26 (2012): 262401.