

流处理器的相变存储器主存性能优化

郝秀蕊, 安虹, 李小强, 汤旭龙

(中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 合肥 230027)

摘要: 将相变存储器(PCRAM)作为流处理器 Imagine 的主存储器, 对其性能进行优化。建立(PCRAM)性能分析模型, 针对 PCRAM 可写次数有限的缺陷, 采用避免冗余位写技术, 使 PCRAM 的生命周期延长 3.4 倍。利用 PCRAM 的非易失性, 避免不必要的缓存行写回。分析访存调度算法对 PCRAM 性能的影响, 结果表明, row/open 调度算法性能较优, 适合 PCRAM 使用。

关键词: 相变存储器; 非易失性; 访存调度算法; 避免冗余位写技术; 流处理器

Main Memory Performance Optimization of Phase Change RAM in Stream Processor

HAO Xiu-rui, AN Hong, LI Xiao-qiang, TANG Xu-long

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

【Abstract】 This paper uses the Phase Change RAM(PCRAM) as the main memory of Imagine stream processor, studies the performance optimization of it. It builds the performance analysis model of PCRAM. In order to enhance the limited PCRAM write endurance, it uses redundant bit-writes removal technology to extend the endurance of PCRAM to an average 3.4x longer. It uses nonvolatile feature to avoid not necessary row buffer write back. It analyzes the memory access schedule algorithms, and results show that the row/open memory access schedule algorithm is suitable for PCRAM.

【Key words】 Phase Change RAM(PCRAM); non-volatility; memory access schedule algorithm; redundant bit-writes removal technology; stream processor

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.084

1 概述

相变存储器(Phase Change RAM, PCRAM)^[1]利用相变材料的晶态和非晶态存储二进制, 是一种新型的非易失性存储器。若将 PCRAM 作为流处理器 Imagine 的主存则需要一系列的优化技术来弥补 PCRAM 的缺点。文献[1]系统地定义了避免冗余位写技术。文献[2]对 3D Cacti 进行了修改, 加入对 PCRAM 性能和功耗建模的支持。本文针对 PCRAM 可写次数有限的缺点, 采用避免冗余位写技术^[1]延长 PCRAM 的生命周期; 利用 PCRAM 的非易失性, 在减少读写延时的同时提高应用性能; 通过评估不同访存调度算法对 PCRAM 性能的影响, 确定适合 PCRAM 技术特点的访存调度算法。

2 PCRAM 背景知识

表 1^[2]对 SRAM、DRAM、FLASH 和 PCRAM 的性能参数进行了比较。

表 1 4 种存储技术的性能参数比较

存储技术	单元大小/ F^2	读延时	写延时	可写次数	静态功耗	易失性
SRAM	>100	0~10 ns	0~10 ns	10^{18}	漏电流	易失
DRAM	6~8	0~10 ns	0~10 ns	10^{15}	漏电流&刷新	易失
NAND Flash	4~6	5 μ s~50 μ s	2 ms~3 ms	10^5	无	非易失
PCRAM	4~20	10 ns~100 ns	100 ns~1 000 ns	10^8 ~ 10^{12}	无	非易失

在存储单元大小方面, 当前 PCRAM 的存储密度是 DRAM 的 2 倍~4 倍; 使用 PCRAM 代替 DRAM 作为处理器的主存^[1]可以有效扩展主存容量。在读写延时方面, PCRAM 的读延时和写延时分别是 DRAM 的 4 倍和 12 倍; PCRAM 的读延时和写延时分别比 NAND Flash 快 500 倍和 1 000 倍。

在静态功耗的对比中, NAND Flash 和 PCRAM 的非易失性, 使其不需要在维持数据有效性上消耗能量, 静态功耗为 0。在可写次数方面, SRAM 和 DRAM 的可写次数接近无穷; NAND Flash 和 PCRAM 的可写次数有限, 是关键的限制因素。综上所述, 虽然 PCRAM 在与 NAND FLASH 的对比中全面占优, 但 PCRAM 在与 DRAM 的比较中, PCRAM 仍需要在控制动态功耗、增加可写次数以及提高访问速度 3 个方面进行改进。

PCRAM 存储单元常用的相变材料是 $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST), 其结构如图 1 所示, 置位和复位过程中的温度特性曲线如图 2 所示。

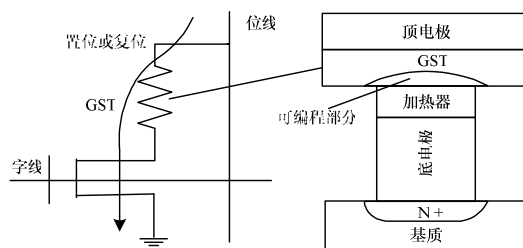


图 1 PCRAM 存储单元结构

基金项目: “核高基”重大专项(2009ZX01036-001-002); 国家自然科学基金资助项目(60970023); 国家“973”计划基金资助项目(2011CB302501)

作者简介: 郝秀蕊(1982—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 微处理器体系结构; 安虹, 教授; 李小强, 博士研究生; 汤旭龙, 硕士研究生

收稿日期: 2011-06-28 **E-mail:** hxr@mail.ustc.edu.cn

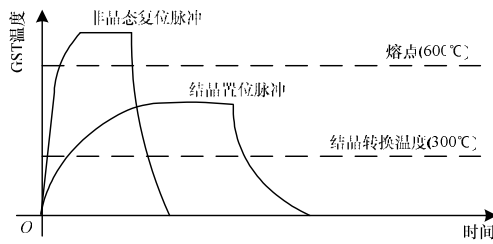


图2 置位和复位过程中的温度特性曲线

2.1 PCRAM 的读写操作

GST 处于晶态和非晶态时电阻值约相差 10^3 , GST 的读操作需要在 GST 两端加上读电压, 通过检测流经 GST 电流的大小来判断 GST 中存储的信息。PCRAM 的写操作分为 SET(写 1)和 RESET(写 0)2 种。SET 操作将 GST 变为晶态, RESET 操作将 GST 变为非晶态。SET 操作需要的电流脉冲幅度小, 持续时间长, 将 GST 的加热温度控制在结晶温度和融化温度之间并保持一段时间, 使 GST 处于晶态。RESET 操作需要的电流脉冲幅度大, 持续时间短, 将 GST 加热至融化温度并迅速冷却, 使 GST 处于非晶态。

2.2 PCRAM 的可写次数和可扩放性

经过多次 SET 和 RESET 操作后, GST 和 Heater 之间的接触变的不再可靠, 导致无法保证对 PCRAM 进行正确的写入操作, 此时 PCRAM 存储单元失效。PCRAM 具有优秀的可扩放性, 表现在可以利用 MLC(Multi-level Cell)存储多个位信息, 特征尺寸可以扩放到 3 nm^3 。

3 测试环境

3.1 Imagine 模拟器

Imagine^[4]处理器是 Stanford 大学开发的一款流处理器芯片, 它通过将数据组织成流在不同的计算核心(Kernel)代码上移动来挖掘数据处理的流并行性^[5]。本文的实验平台是 Imagine 时钟精确的模拟器 Isim。

3.2 PCRAM 的建模

本文以 DRAM 为基准, 为 PCRAM 建立了性能分析模型。PCRAM 被描述为 $\{D, S, W, W_{\max}\}$, 其中, PCRAM 的存储密度是 DRAM 的 D 倍; 读操作延时是 DRAM 的 S 倍; 写延时是 DRAM 的 W 倍; W_{\max} 是 PCRAM 的最大可写次数。依据 2008 年-2010 年间相关论文中采用的参数, 将 PCRAM 表述为 $\{D=4, S=4, W=12, W_{\max}=10^8\}$ 。

3.3 测试程序

本文选取 4 个测试程序, 对 PCRAM 作为 Imagine 主存时的运行性能进行测试。选取的程序都采用 KernelC 和 StreamC 语言编写, 测试程序描述如表 2 所示。

表2 测试程序描述

测试程序	描述
FFT	1024 点单精度的快速傅里叶变换算法
DEPTH	图片立体深度析取算法
MPEG	以 MPEG-2 为标准的视频图像编码算法
JPEG	采用 Baseline System 的图像编码算法

4 测试结果与优化分析

本文的测试数据采用相同的归一化标准, 都以没有利用非易失性且调度算法为 inorder 时的各测试程序总执行周期数和访存周期数为基准。

4.1 避免冗余位写技术

由于当前 PCRAM 允许写入次数有限, 因此如何避免不必要的写操作成为延长 PCRAM 生命周期的主要方法。避免

冗余位写技术在 1 个 PCRAM 单元存储 1 个逻辑位的情况下有 50% 的概率是不需要写入新内容的。若写 0 和写 1 发生的概率相同, 则避免冗余位写技术能使 PCRAM 的生命周期平均延长 1 倍, 动态的写操作功耗约减少 50%。实验结果如图 3 所示。

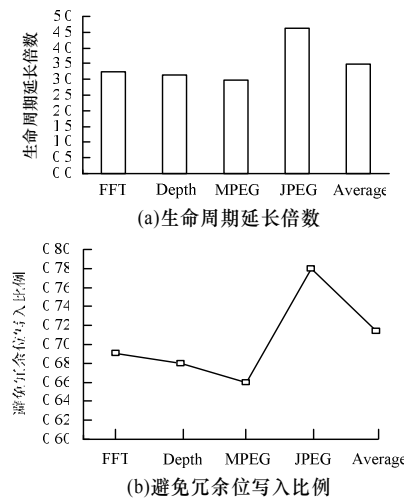


图3 避免冗余位写对 PCRAM 生命周期的影响

可以看出, 对 FFT、DEPTH、MPEG、JPEG 这 4 个测试程序采用避免冗余位写可以分别避免 69%、68%、66% 和 78% 的位写入操作, PCRAM 生命周期延长为原来的 3.2 倍、3.1 倍、2.9 倍和 4.6 倍, 使 PCRAM 的生命周期平均延长为原来的 3.4 倍。

4.2 非易失性

现代 DRAM 存储器的破坏性读出性质要求被激活的缓存行, 在发生预加电时缓存行写回 DRAM。PCRAM 没有破坏性读出性质, 被激活的缓存行只有被改写后才需要在预加电时写回存储器。要实现非脏缓存行的直接丢弃需要为缓存行设一个标识位, 记录当前缓存行是否被修改。改写缓存行时标识位会被置位。这样, 在发生预加电时只需要换出标识位被置位的缓存行。利用 PCRAM 的非易失性几乎可以避免所有的读操作引起的缓存行换出。因为读操作没有引起数据的改变, 所以不需要执行预加电操作。由于 PCRAM 的写操作延时较长、功耗较高, 因此避免不必要的缓存行写回操作能明显延长 PCRAM 的生命周期和降低功耗, 同时也降低了 PCRAM 的读延时。图 4 在总执行周期数和访存性能 2 个方面显示了利用非易失性前后应用性能的变化, 其中的数据是对 4 种调度算法的性能求算术平均的结果。

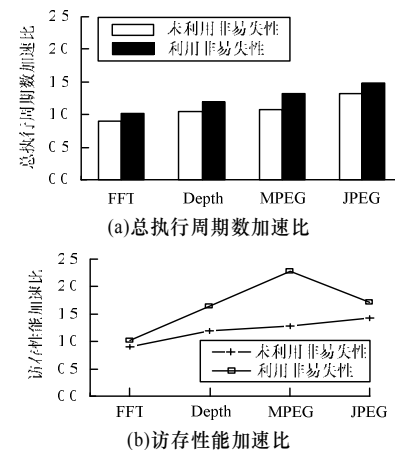


图4 非易失性对 PCRAM 性能的影响

实验结果显示, 利用 PCRAM 的非易失性 FFT、DEPTH、MPEG 和 JPEG 在访存性能上分别取得 11.7%、44.8%、100% 和 29% 的提升; 访存性能的改善使 FFT、DEPTH、MPEG 和 JPEG 在总执行周期数上分别取得 10.9%、14.6%、25.4% 和 16.9% 的加速效果。

4.3 PCRAM 访存调度算法分析

Imagine 为了提高片外访存带宽的利用率, 通过 Address Generator(AG)^[5]将流访存请求转化为独立的访存请求。bank 控制器利用访存调度算法对访存请求的发射顺序进行重新排序来挖掘数据访问在已激活缓存行中的空间局部性。本文选用的访存调度算法有 in-order、first-ready、col/closed 和 row/open。

4.3.1 适合 DRAM 的访存调度算法

文献[4]比较了不同调度算法对 Imagine 的 DRAM 主存带宽的影响, 结果显示 closed 调度策略拥有更优的性能。原因是 DRAM 可以将对当前缓存行的最后一个列访问请求和对当前缓存行的预加电操作合并在一起执行, 减少了后续访存请求的等待时间。但 col/closed 存在过早对当前缓存行进行预加电操作的可能。

4.3.2 访存调度算法对 PCRAM 的影响

使用 PCRAM 作为 Imagine 的主存时, 由于 PCRAM 读写操作延时的不对称, 导致行激活(12 个周期)代价小于预加电(36 个周期)的代价。row/open 使已激活的缓存行存活时间更长, 最大限度地避免了预加电执行的次数, 所以其性能是 4 种算法中最优的。而 col/closed 算法总在不断地尝试换出缓存行, 使预加电执行的次数最大化, 导致 col/closed 算法的性能最差。图 5 显示了利用 PCRAM 的非易失性前访存调度算法对应用访存性能的影响。利用非易失性前 row/open 对应最优的访存性能; col/closed 的访存性能最差。对于 FFT、DEPTH、MPEG 和 JPEG, row/open 和 col/closed 相比在访存性能上分别有 39%、84%、123% 和 75% 的性能提升。

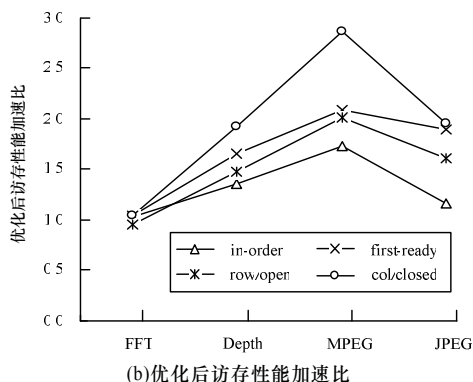
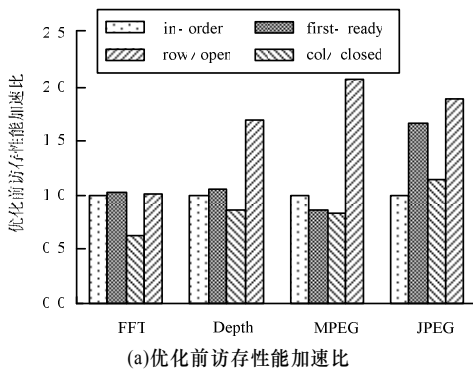


图 5 访存调度算法对访存性能的影响

FFT 是受调度算法影响最不明显的程序, 因为 1 024 点的单精度 FFT 访存数量少, 且 94% 的访存是规则的跨步流, 只有一个不规则的位反(bit-reversed)流。bit-reversed 流和跨步流相似, 对每个已激活行都有大量的列访问请求, 但是在请求到来的间隔时间上比跨步流更大。因此, 让已激活的缓存行存活尽可能长的时间对跨步流和位反流的访存性能都是有利的。对 FFT 来说 row/open 远优于 col/closed, 而 PCRAM 长达 36 个周期的预加电延时使 col/closed 的劣势更加明显。同时对跨步流的规则访存来说 in-order 和 first-ready 已经足够高效, 使用激进的 row/open 得不到预期的效果。

图 6 显示了优化前后访存调度算法对应用总执行周期数的影响。

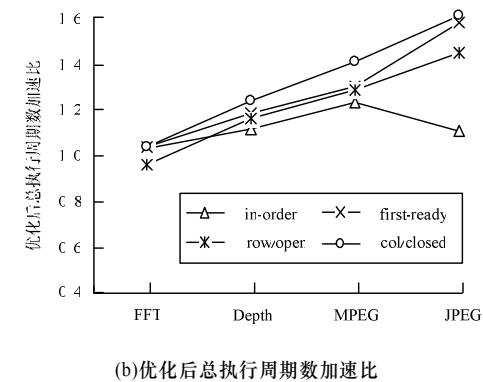
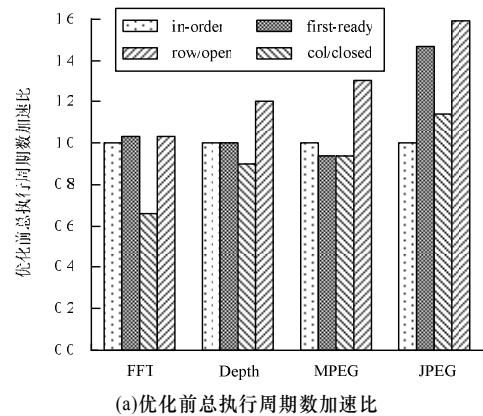


图 6 访存调度算法对总执行周期数的影响

由于访存只是总执行周期的一部分, 因此不同访存调度算法对总执行周期数的影响要比对访存性能的影响小。如图 6 所示, row/open 和 col/closed 分别使 4 个测试程序得到最优和最差的性能。对于 FFT、DEPTH、MPEG 和 JPEG, row/open 和 col/closed 相比在总执行周期数上分别取得 37%、30%、36% 和 45% 的加速效果。

4.4 非易失性和访存调度算法的综合影响

图 5(b)和图 6(b)表示利用 PCRAM 的非易失性后访存调度算法对测试程序的访存性能和总执行周期数的影响。它们呈现了基本相同的变化趋势: 利用 PCRAM 的非易失性后, 4 种调度算法对应的访存性能和总执行周期数都有一定程度的加速, 且各访存调度算法之间的性能差距在减小。col/closed 从非易失性中得到了最大的好处, 平均访存性能提升了 64%。此时, 最优的访存调度算法仍然是 row/open, row/open 从非易失性中平均得到 27% 的访存性能提升。利用 PCRAM 的非易失性后, row/open 在总执行周期数上分别比

(下转第 256 页)

