

Memórias Não Voláteis: Uma visão geral sobre as principais tecnologias, suas características e níveis de maturidade

Pedro Ferro Laks¹, Emílio Francesquini¹

¹Centro de Matemática Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC (UFABC)
Santo André – SP – Brasil

pedro.laks@aluno.ufabc.edu.br, e.francesquini@ufabc.edu.br

Abstract. *Recent advances in the research of new memory technologies aiming at the unification of work and secondary memories are under the spotlight. In this survey, we detail the current state of the development of these technologies which have been collectively called emerging memories, or persistent memories, or SCM (Storage Class Memory). We also describe the progress of each memory technology taking into account the most important operational characteristics of each technology. We hope this text will be able to stand as a reference on which technologies deserve more attention. Indeed, some of the proposed technologies have better short-term perspectives while some others still may take a few years of research to become more mature alternatives.*

Resumo. *Recentemente vem chamando a atenção o avanço nas pesquisas de novas tecnologias de memória que buscam unificar as memórias de trabalho e secundária. Neste artigo detalhamos o atual estado de desenvolvimento das principais tecnologias com esse objetivo, sendo elas chamadas de memórias emergentes, ou memórias persistentes ou SCM (Storage Class Memory). Além de descrever a evolução tecnológica de cada memória, essa revisão leva em conta as características operacionais de cada tecnologia. Esperamos com isto fornecer um material de referência sobre quais tecnologias atualmente merecem uma maior atenção. Algumas delas têm uma melhor perspectiva no curto prazo, já outras, devem levar alguns anos até se tornarem alternativas mais maduras.*

1. Introdução

Hoje em dia, os sistemas de HPCs (*High Performance Computing*) sofrem de um grande gargalo, que é o seu armazenamento e a necessidade da constante troca de dados entre a DRAM (*Dynamic RAM*) e o armazenamento secundário, que é um processo lento, deixando o CPU ocioso. Nos últimos anos, tem se popularizado os SSDs (*Solid State Drive*), porém este dispositivo não resolve os problemas clássicos de um armazenamento interno que são sua baixa velocidade e durabilidade quando comparados a memória DRAM. Embora os SSDs sejam mais rápidos que os HDDs (*Hard Disk Drive*), tipicamente 200 vezes na leitura e 10 vezes na escrita, eles ainda são mais lentos que as memórias DRAM, na ordem de $5 \cdot 10^2$ na leitura e 10^4 na escrita [28]. Além disto, o SSD tem baixa durabilidade, que é de 10^5 ciclos de escrita, um número baixo considerando que o HD tem durabilidade de 10^{12} ciclos de escrita e a memória DRAM 10^{15} [38]. A contínua busca por memórias com maior capacidade e desempenho fomentou a pesquisa e a criação de uma nova classe de memórias, as SCM. Neste texto usamos a definição para SCMs primeiramente apresentada em 2008 em [38, 17]: SCM é uma nova classe de memória que

busca unificar a memória e o armazenamento interno, unindo a velocidade e durabilidade das DRAM com a não volatilidade e baixo custo do armazenamento interno. Logo, SCMs tem alguns requisitos bem claros, são eles: latência de escrita e leitura entre 10 ns e 100 ns [38], durabilidade entre 10^8 ciclos e 10^{12} ciclos de escrita [38], retenção de dados de 10 anos ou mais [17], densidade suficiente para substituir o armazenamento secundário (na ordem de 1 TB) num armazenamento padrão de 2,5 polegadas [38, 17], além de um baixo custo por bit, algo próximo do preço atual das NAND *Flash*. Com essas características a SCM, acabaria com o lento processo de troca de dados entre a memória principal e a secundária, através da unificação das duas. O panorama de novas tecnologias disponíveis no mercado é vasto, sendo assim, neste texto nos concentraremos nas tecnologias que buscam atender aos requisitos para uma SCM que descrevemos, assim como restringimo-nos às tecnologias mais difundidas tanto comercialmente como no contexto de pesquisas acadêmicas: nvSRAM, FRAM, OxRAM, CBRAM, PCM, Intel 3D XPoint, STT-MRAM, SOT-MRAM e Ultram.

2. Método

Para selecionar as memórias, foi utilizado as palavras chaves "emerging memories", "non-volatile memories" e "storage class memory" no Google Acadêmico, para pegar os artigos com maior número de citações e que comentassem sobre mais de uma memória. Desse modo foi coletado quais as memórias deveriam ser pesquisadas, e alguns de seus dados. Em seguida, cada memória foi pesquisada individualmente por seu respectivo nome.

3. Tecnologias

O tempo de transferência de dados entre a memória principal e a memória secundária consome grande parte do tempo de aplicações de HPC, sendo este um período que o processador fica praticamente ocioso, ou seja, na prática desperdiçando processamento, por isso é muito importante o surgimento e futuro uso de novas memórias para reduzir ou acabar com esse problema. Desse modo, a seguir descrevemos as principais características operacionais de cada memória, um pouco de sua história, seus pontos positivos e negativos e, na nossa avaliação, se estão maduras o suficiente para uso imediato levando em consideração a definição de SCM apresentada.

3.1. nvSRAM (*Non Volatile Static RAM*)

A tecnologia de memória nvSRAM possui como características: leitura/escrita entre 20 ns a 45 ns [22], baixo consumo de energia [48] durabilidade de até $2 \cdot 10^8$ [48] e retenção de dados de 20 anos [22]. No entanto, ela nada mais é que uma SRAM (*Static RAM*) unida a uma memória não volátil [48] e por isso tem os mesmos problemas da SRAM, que são a baixa capacidade de armazenamento, baixa escalabilidade [44], além de um tamanho de célula muito grande, acima de 6 transistores por célula [48, 42], com essa grande quantidade de transistores o custo de fabricação também se torna mais alto. Logo, o uso de NVSRAM parece, na prática, estar limitado ao emprego de memória não volátil para armazenar dados da SRAM [48].

3.2. FRAM (*Ferroelectric RAM*)

A FRAM possui como características: latência de escrita de 50 ns [27], latência de leitura entre 20 ns e 80 ns [27], memórias comercializadas com latência de leitura/escrita entre 110 ns [23] e 150 ns [13], durabilidade entre 10^{10} [13] e 10^{15} [24] ciclos de leitura e

escrita, retenção de dados de 10 anos [17, 13] até 151 anos [24], e baixo consumo de energia [17]. Vale também mencionar que a leitura danifica a célula, diferente de outros candidatos a SCM [31]. Adicionalmente, a tecnologia da memória FRAM, tem alguns pontos interessantes, como boa velocidade, boa durabilidade e boa retenção de dados. Sua principal desvantagem é seu grande tamanho de célula de $15 F^{21}$ [17] devido ao grande capacitor ferroelétrico, que também é a razão de sua baixa escalabilidade [17, 31]. Além de ser uma tecnologia já antiga (seu princípio de funcionamento foi descrito em 1952 [31]) e com produção comercial desde 1993 [27], é improvável que seja considerada no curto prazo como uma séria candidata à SCM.

3.3. ReRAM *Resistive RAM*

As memórias ReRAM são normalmente divididas nas subcategorias OxRAM e CBRAM. Ambas as tecnologias possuem algumas características comuns como: boa escalabilidade, devido ao tamanho mínimo de célula de apenas $4F^2$ [16, 46, 35], retenção de dados de 10 anos [46], baixo custo de produção [16, 35] e em geral trabalham abaixo de 100 ns [46].

3.3.1. OxRAM (*Oxide Resistive RAM*)

A OxRam possui como características: velocidade de leitura/escrita de 5 ns a 100 ns [32] com durabilidade que varia entre 10^6 e 10^{12} ciclos [16]. Ao considerar os melhores dados da OxRAM, temos características ideais para uma SCM, como durabilidade, densidade, velocidade e baixo custo. Sua desvantagem, contudo, é que suas características operacionais ideais nunca vem de forma simultânea [16], por exemplo a durabilidade de 10^{12} [8] vem acompanhada de uma alta tensão de até 6 V [8] e velocidade de leitura/escrita mediana de 50 ns [8]. Além do mais a OxRAM ainda é considerada uma tecnologia quase que experimental, com vários problemas de confiabilidade [16]. Na prática, esses problemas de confiabilidade refletem nas memórias OxRAM comercializadas bem pouco animadoras, com durabilidade entre $5 \cdot 10^5$ [15] e 10^6 [14] ciclos e velocidade de escrita de apenas 10 ms [14]. Sendo assim, a OxRAM é uma memória com grande potencial e merece atenção, suas pesquisas foram iniciadas em 2000 [46] e embora seja uma tecnologia relativamente antiga, a sua evolução se mostrou mais complicada do que se imaginava, o que se reflete na sua atual maturidade.

3.3.2. CBRAM (*Conductive Bridge RAM*)

Possui como características, tensão de ± 3 V [9], velocidade de leitura/escrita entre 5 ns [16] e 20 ns [35], durabilidade entre 10^4 e 10^7 ciclos de escrita [9], e em alguns casos 10^8 ciclos [19], que é relativamente baixo quando comparadas à OxRAM [16] que chegam a 10^{12} ciclos [16], além disso já existe um protótipo de 16 Gb [41] numa célula de $6F^2$ [35]. A CBRAM sofre principalmente das mesmas limitações da OxRAM, que são as características operacionais ideais nunca ocorrerem de forma simultânea [16], por exemplo, a memória de 16 Gb citada tem apenas 10^6 ciclos de escrita de durabilidade [41], além de ter falhado em demonstrar uma alta confiabilidade [9]. Logo, a CBRAM é uma tecnologia interessante, com características de desempenho adequados mas, por enquanto,

¹O F^2 é o menor processo de litografia possível, assim é possível medir o tamanho da memória independente da sua tecnologia de fabricação [18]

ainda com uma durabilidade inferior a tecnologias semelhantes como a OxRAM, além de não apresentar vantagens significativas em relação a essas. Embora a CBRAM seja uma tecnologia antiga, apresentada em 1999 [9] ela ainda não está madura para o uso atual.

3.4. PCM (*Phase-Change Memory*)

A *Phase Change Memory* possui como características: retenção de dados de 10 anos [33], velocidade de escrita menor que 100 ns [18] podendo chegar a 25 ns [33], 10 ns de velocidade de leitura [42], normalmente entre 10^8 e 10^9 ciclos de escrita [45] podendo em certos casos chegar a 10^{12} ciclos [33], leitura não destrutiva, tamanho de célula entre $4F^2$ e $6F^2$ [18] e boa escalabilidade [33]. A PCM possui boa velocidade, boa durabilidade, boa escalabilidade, baixo custo (demonstrado pela Intel 3D XPoint), porém assim como nas ReRAM, as características operacionais da PCM nunca ocorrem de forma simultânea [33], e esse é o seu principal desafio. A PCM é uma tecnologia com um longo desenvolvimento e por isso já é uma das mais maduras candidatas a SCM, visto que os seus princípios para mecanismo de *switching* tiveram pesquisa iniciada 1970 [33]. Em 2000 a PCM já começou a pesquisa com propósito de ser uma memória volátil, e até possivelmente memória universal[33]. Embora antiga, a PCM é uma tecnologia que continua avançando e merece atenção pelo seu grande potencial. Hoje em dia ela se mantém relevante, tendo sido produzida em larga escala através da tecnologia 3D XPoint da Intel/Micron, além do mais novas pesquisas encontraram resultados animadores como 10 ns de escrita [29], e por isso merece atenção no curto-médio prazo.

3.4.1. Intel 3D XPoint Persistent Memory

A 3D XPoint, é uma implementação da tecnologia PCM em estrutura tridimensional e de grande densidade, além de ter produção comercial [26]. Ela possui como destaques: alta densidade por slot de memória (16x maior que a DRAM [3]), alta densidade por die (4,5x maior que a memória DRAM [26]), pequeno tamanho de célula $4F^2$ [26], alta capacidade (atualmente de até 512Gb[3]), e boa durabilidade 10^8 ciclos de leitura e escrita [12]. Tais características também são acompanhadas de um preço competitivo, mais barato que a memória RAM [12, 3]. Por outro lado, sua velocidade de leitura e escrita é aproximadamente 370 ns, além disso possui 2,7 vezes menos largura de banda na leitura e 12,9 vezes menos largura de banda na escrita [43]. Desse modo a tecnologia 3D XPoint é uma candidata séria (dentro o que está disponível atualmente no mercado) a se tornar SCM. Além deste potencial, apresenta os requisitos de durabilidade, capacidade, densidade e preço ideais para uma SCM. Contudo, ela ainda sofre do problema de baixa velocidade de escrita e leitura (embora somente 4x mais lenta) [43], baixa largura de banda além do alto consumo energético em escritas, 3x maior que o consumo em leituras [25]. Apesar de todas as características acima deixarem claro que a memória 3D XPoint merece atenção a curto e médio prazo, após a Micron ter abandonado sua produção e a Intel encerrado os negócios das memórias 3D XPoint [39], essa memória não possui perspectivas futuras.

3.5. STT-MRAM (*Spin Transfer Torque Magnetoresistive RAM*)

A *Spin Transfer Torque* MRAM possui como características: durabilidade entre 10^{15} [42] e 10^{16} [47] ciclos de escrita, velocidade de escrita e leitura entre 2 ns e 20 ns [27], estrutura de 1 transistor e 1 MTJ (*Magnetic Tunnel Junction*) [20], retenção de dados maior que 10 anos [47], alto custo devido a difícil integração com CMOS [5, 42], (entre

10 e 100 dólares por Gb [40]), tamanho de célula entre $6F^2$ e $30 F^2$ [40], o que gera uma escalabilidade intermediária com módulos de STT-MRAM chegando a no máximo 1 Gb [7]. A STT-MRAM possui boa velocidade, boa durabilidade, boa retenção de dados, mas a limitação é que, assim como outras memórias citadas, as características operacionais ideais nem sempre ocorrem de forma simultânea, e normalmente é necessário fazer concessões, ou trocas para conseguir um determinado resultado bom [5]. Um exemplo é a retenção de dados e a durabilidade que ou consegue-se uma boa retenção ou uma boa durabilidade e não as duas simultaneamente [21]. A STT-MRAM é uma memória bem madura, tendo tido iniciada sua pesquisa em 1996 [11] e, desde então, apresentou avanços significativos. Alguns exemplos são o projeto para permitir a integração STT-MRAM numa arquitetura 3D X-Point [47], além de novas memórias com maior densidade e capacidade como a Everspin de 1Gb [7]. Logo, pelas suas ótimas características e evolução contínua nos últimos anos, a STT-MRAM merece atenção a médio prazo.

3.6. SOT-MRAM (*Spin Orbital Torque Magnetoresistive RAM*)

A SOT-MRAM possui como características: velocidade de escrita entre 3 ns a 10 ns[6], podendo também chegar na faixa dos sub ns [30], velocidade de leitura mais lenta que a de escrita [6], durabilidade entre 10^{10} [20] e $5 \cdot 10^{10}$ [30] ciclos de escrita, possui célula padrão de 3 terminais [20] com, 2 transistores e 1 MTJ [20] e tamanho entre $30F^2$ [34] - $118F^2$ [37] o que deixa a memória grande e com baixa escalabilidade [6, 34]. Outro dado importante é que a SOT-MRAM é muito recente, enquanto a tecnologia de STT-MRAM foi apresentada em 1996 [11] a SOT-MRAM só começou a ser alvo de pesquisas em 2008 [2] e 2009 [1]. Por ser uma tecnologia recente e com poucos dados concretos, ainda deve levar alguns para de fato haver alternativas comerciais [6]. Logo, apesar de SOT-MRAM ser uma tecnologia interessante, já que possui boa durabilidade e velocidade de escrita extremamente veloz, ainda é preciso que pesquisas reduzam o tamanho da célula e melhorem a sua escalabilidade. Como isto é algo que ainda deve ser viável, no mínimo, apenas a médio prazo o seu uso, por ora, está limitado a memória cache [6].

3.7. Ultraram

A Ultraram² possui como características: tensão de aproximadamente 2,5 V e 1000 anos de retenção de dados. Sua velocidade de leitura/escrita fica entre 500 ps (velocidade simulada num transistor 10^6 menor) e $500 \mu s$ (velocidade medida experimentalmente). Seu tamanho de célula é pequeno, menor que $4F^2$, e é baseada em 1 transistor, assim ela tem um excelente potencial de escalabilidade. A durabilidade dela é de até 10^7 ciclos de escrita, com simulações de que numa litografia de 100 nm seja possível 10^{13} ciclos de escrita. Desse modo a Ultraram tem um ótimo potencial de virar uma memória universal, as simulações feitas a respeito dessa memória encaixam ela perfeitamente numa SCM e estudos recentes mostram que ela pode ser integrada em wafers de silício [10]. Essa tecnologia de memória, contudo, só começou a ser pesquisada em 2018³ e com uma primeira publicação em 2019 [36]. Embora as pesquisas estejam avançando rapidamente, é uma tecnologia que ainda deve levar alguns anos para atingir maturidade e ser possível de produzir em larga escala, e por isso não deve se esperar nada dessa memória no curto prazo.

²Não confundir Ultraram que nos referimos aqui com a tecnologia homônima produzida pela da Xilinx/AMD baseada em SRAM.

³<https://www.lancaster.ac.uk/physics/about-us/people/manus-hayne#projects>

4. Trabalhos Relacionados

Em [4], os autores comentam o funcionamento, confiabilidade e temperatura de memórias não voláteis, mas não são fornecidos dados críticos a respeito de cada memória, já neste trabalho nós focamos menos na tecnologia (e seu funcionamento) e mais nas suas características operacionais. Em [42] os autores comentam sobre funcionamento de cada memória, mas também com um bom foco em características operacionais de cada uma, todavia o artigo não cita as memórias Ultraram e SOT-MRAM (devido a data de publicação), e também não fala da história delas, enquanto nosso texto trata dessas memórias, e menciona suas histórias. Em [31] os autores abordam o funcionamento de cada memória, sua história, suas variações e seus respectivos progressos, no entanto ele aborda poucos dados numéricos, faltando dados como velocidade, durabilidade e retenção de dados, algo que nosso trabalho focou mais.

5. Conclusão

No mercado atual não há nenhuma tecnologia que consiga substituir a memória principal e a memória secundária ao mesmo tempo, mas isso não significa que esse próximo passo não ocorrerá. É inevitável o surgimento de novas memórias que ao menos fiquem no meio do caminho entre essas duas tecnologias, pois os sistemas de HPC sofrem desse gargalo de memória, que é gerado devido a grande diferença de velocidade entre o armazenamento principal e secundário. Sendo assim existem tecnologias promissoras que no futuro podem sim unificar a memória principal com a memória secundária, sendo as mais promissoras a PCM devido ao grande amadurecimento e produção comercial, a STT-MRAM devido à grande evolução ao longo dos anos, e a Ultraram que possui características simuladas ideais para uma SCM. Assim como a memória NAND *Flash*, essas pesquisas demoram décadas para serem aperfeiçoadas a ponto de virarem um novo padrão de mercado, e assim provavelmente ocorrerá com essas novas memórias emergentes.

6. Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2019/26702-8 pelo apoio a este trabalho.

Referências

- [1] A.Abiegue et al. Spin-orbit coupling mediated spin torque in a single ferromagnetic layer. *Physical Review B*, 80(9):094424, 2009.
- [2] A.Manchon and S.Zhang. Theory of nonequilibrium intrinsic spin torque in a single nanomagnet. *Physical Review B*, 78(21):212405, 2008.
- [3] A.Shanbhag et al. Large-scale in-memory analytics on intel® optane™ dc persistent memory. In *Proceedings of the 16th International Workshop on Data Management on New Hardware*, pages 1–8, 2020.
- [4] B.Moyer. Inside the new non-volatile memories. <https://semiengineering.com/inside-the-new-non-volatile-memories/>, 2020.
- [5] B.Moyer. Mram evolves in multiple directions. <https://semiengineering.com/mram-evolves-in-multiple-directions/>, 2021.
- [6] B.Moyer. Sot-mram to challenge sram. <https://semiengineering.com/sot-mram-to-challenge-sram/>, 2022.

- [7] B.Tallis. Everspin begin production of 1gb stt-mram. <https://www.anandtech.com/show/14580/everspin-begins-production-of-1gb-sttmram>, June 2019.
- [8] C.Hsu et al. Self-rectifying bipolar tao x/tio 2 rram with superior endurance over 10¹² cycles for 3d high-density storage-class memory. In *2013 Symposium on VLSI Technology*, pages T166–T167. IEEE, 2013.
- [9] D.Jana et al. Conductive-bridging random access memory: challenges and opportunity for 3d architecture. *Nanoscale research letters*, 10(1):1–23, 2015.
- [10] D.Lane. *Ultraram™: Design, Modelling, Fabrication and Testing of Ultra-Low-Power III-V Memory Devices and Arrays*. PhD thesis, Lancaster University, 2021.
- [11] D.Ralph and M.Stiles. Spin transfer torques. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(7):1190–1216, 2008.
- [12] O. et al. Performance characterization of a dram-nvm hybrid memory architecture for hpc applications using intel optane dc persistent memory modules. In *Proceedings of the International Symposium on Memory Systems*, pages 288–303, 2019.
- [13] Fujitsu Ltd. *Memory FRAM 4 M Bit (512 K × 8) MB85R4001A*, 2 2013.
- [14] Fujitsu Ltd. *Memory ReRAM 8M (1024 K x 8) Bit SPI MB85AS8MT*, 2 2013.
- [15] Fujitsu Ltd. *Memory ReRAM 12M (1536 K x 8) Bit SPI MB85AS12MT*, 12 2021.
- [16] F.Zahoor et al. Resistive random access memory (rram): an overview of materials, switching mechanism, performance, multilevel cell (mlc) storage, modeling, and applications. *Nanoscale research letters*, 15(1):1–26, 2020.
- [17] G.Burr et al. Overview of candidate, device technologies for storage-class memory. *IBM Journal of Research and Development*, 52(4.5):449–464, 2008.
- [18] G.Burr et al. Phase change memory technology. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 28(2):223–262, 2010.
- [19] G.Molas et al. Advances in oxide-based conductive bridge memory (cbram) technology for computing systems. In *Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology*, pages 321–364. Elsevier, 2019.
- [20] H.Lin et al. All-electrical control of compact sot-mram: Toward highly efficient and reliable non-volatile in-memory computing. *Micromachines*, 13(2):319, 2022.
- [21] S. Ikegawa et al. Commercialization of mram—historical and future perspective. In *2021 IEEE International Interconnect Technology Conference (IITC)*, pages 1–3, 2021.
- [22] Infineon Technologies AG. *CY14B108L CY14B108N 8-Mbit (1024 K × 8/512 K × 16) nvSRAM*, 4 2017. Rev. *P.
- [23] Infineon Technologies AG. *FM22L16 4-Mbit (256K × 16) F-RAM*, 11 2019. Rev. *H.
- [24] Infineon Technologies AG. *Excelon LP 16-Mbit (2048K × 8) Serial (SPI) F-RAM*, 12 2020. Rev. *A.
- [25] Intel Corporation. *Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual*, 2 2022.
- [26] J.Cho. Intel 3d xpoint memory die removed from intel optane™ pcm (phase change memory). <https://www.techinsights.com/blog/intel-3d-xpoint-memory-die-removed-intel-optanetm-pcm-phase-change-memory>, may 2017.

- [27] J.Meena et al. Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale research letters*, 9(1):1–33, 2014.
- [28] J.Mittal and S.Mittal. Opportunities for nonvolatile memory systems in extreme-scale high-performance computing. *Computing in Science & Engineering*, 17(2), 2015.
- [29] J.Shen et al. Thermal barrier phase change memory. *ACS applied materials & interfaces*, 11(5):5336–5343, 2019.
- [30] K.Garello et al. Sot-mram 300mm integration for low power and ultrafast embedded memories. In *2018 IEEE Symposium on VLSI Circuits*, pages 81–82. IEEE, 2018.
- [31] L.Baldi et al. *Emerging memories*. Solid-State Electronics, 2014.
- [32] L.YingTao et al. An overview of resistive random access memory devices. *Chinese Science Bulletin*, 56(28):3072–3078, 2011.
- [33] M.Gallo and A.Sebastian. An overview of phase-change memory device physics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(21):213002, 2020.
- [34] M.Harrari et al. Mram: from stt to sot, for security and memory. In *2018 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [35] M.Kozicki et al. Conductive bridging random access memory—materials, devices and applications. *Semiconductor Science and Technology*, 31(11):113001, 2016.
- [36] O.Tizno et al. Room-temperature operation of low-voltage, non-volatile, compound-semiconductor memory cells. *Scientific reports*, 9(1):1–8, 2019.
- [37] R.Alhalabi et al. High density sot-mram memory array based on a single transistor. In *2018 Non-Volatile Memory Technology Symposium*, pages 1–3. IEEE, 2018.
- [38] R.Freitas and W.Wilcke. Storage-class memory: The next storage system technology. *IBM Journal of Research and Development*, 52(4.5):439–447, 2008.
- [39] R.Smith. Intel to wind down optane memory business - 3d xpoint storage tech reaches its end. <https://www.anandtech.com/show/17515/intel-to-wind-down-optane-memory-business>, 2022.
- [40] S.Bertolazzi. Mram technology and market trends. *Flash Memory Summit*, 2019.
- [41] S.Sills et al. A copper reram cell for storage class memory applications. In *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI Technology) : Digest of Technical Papers*, pages 1–2. IEEE, 2014.
- [42] S.Yu and P.Chen. Emerging memory technologies: Recent trends and prospects. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 8(2):43–56, 2016.
- [43] T.Hirofuchi et al. A prompt report on the performance of intel optane dc persistent memory module. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 103(5), 2020.
- [44] W.Wong. Unleashing mram as persistent memory, 2018.
- [45] W.Zhang et al. Designing crystallization in phase-change materials for universal memory and neuro-inspired computing. *Nature Reviews Materials*, 4(3):150–168, 2019.
- [46] Y.Chen et al. Reram: History, status, and future. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(4):1420–1433, 2020.
- [47] Y.Huai et al. High density 3d cross-point stt-mram. In *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, pages 1–4. IEEE, 2018.
- [48] Y.Xie et al. *Emerging memory technologies: design, architecture, and applications*. Springer, 2013.