



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Proseminar Speicher- und Dateisysteme

NVRAM

vorgelegt von

Nick Schüler

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik

Studiengang: Wirtschaftsinformatik
Matrikelnummer: 7052263

Betreuer: Jakob Lüttgau

Hamburg, 2019-02-28

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Begriffserklärung	2
1.2	Einordnung	2
2	FERAM	2
2.1	Aufbau und Funktion	2
2.2	Vorteile	3
2.3	Probleme	3
2.4	Anwendung	4
3	MRAM	4
3.1	Aufbau und Funktion	4
3.2	Toggle-Write-MRAM	4
3.3	Spin-Transfer-Torque MRAM	5
3.4	Vorteile	6
3.5	Probleme	6
3.6	Anwendung	7
4	ReRAM	7
4.1	Aufbau und Funktion	7
4.2	Anwendung	7
5	PCRAM	7
5.1	Aufbau und Funktion	7
5.2	Probleme	9
5.3	Anwendung	9
6	3D-XPoint	9
7	Schlussfolgerung	10

1 Einleitung

1.1 Begriffserklärung

NVRAM entspricht der Abkürzung Non-Volatile Random Access Memory und behält dementsprechend seinen Dateninhalt auch ohne externe Energieversorgung bei. Es gehört zur Kategorie des RAM, welches einen Datenspeicher mit wahlfreiem Zugriff beschreibt und meist bei Computern als Arbeitsspeicher eingesetzt wird[2].

1.2 Einordnung

Häufig wird ein NVRAM gebildet aus der Kombination eines herkömmlichen flüchtigen RAM-Speichers mit einem Energiespeicher in Form einer Batterie, eines Akkumulators oder eines Doppelschicht-Kondensators. Der Energiespeicher besteht meist aus SRAM-Zellen und liefert die benötigte Energie zum Datenerhalt[1].

Unter NVRAM fallen jedoch hauptsächlich Speichertechniken, die auf verschiedenen physikalischen Effekten beruhen. Dazu zählen FERAM, MRAM, ReRAM und PCRAM.

2 FERAM

2.1 Aufbau und Funktion

FERAM entspricht der Abkürzung Ferroelectric Random Access Memory und nutzt zur Speicherung die ferroelektrischen Eigenschaften von Kristallen.

Ferroelektrizität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Polarisation der Stoffe mit einem elektrischen Dipolmoment durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes umgeschaltet werden kann. Dies ist möglich, da sie auch ohne ein angelegtes elektrisches Feld eine Polarisation besitzen. Verwendet werden beispielsweise Stoffe wie Blei-Zirkonium-Titanat (PZT) oder Bariumtitanat (BaTiO_3).

Die FERAM- Speicherzelle besteht ähnlich wie eine DRAM-Zelle aus einem Transistor und einem Kondensator (Vergleiche Abbildung 2). Der Unterschied besteht darin, dass der Kondensator mit einem ferroelektrischem Dielektrikum besetzt ist. Bei den Schaltungsvarianten kommen meist 1T1C- bzw. 2T2C-Zellen zum Einsatz. Die Begriffe beschreiben jeweils die Anzahl der Transistoren und Kondensatoren.

Der Transistor wird zur Adressierung der gewünschten Zelle benötigt. Beschrieben werden Zellen, indem nach Auswahl der gewünschten Speicherzelle über die Wort-

und Bitleitungen die Polarisation des Ferroelektrikums durch einen Spannungspuls gesetzt wird.

Beim Lesen wird zunächst die Zelle mit einem definierten Zustand beschrieben. Abhängig davon, ob sich die Polarisationsrichtung ändert, entsteht ein unterschiedlicher Verschiebungsstrom. Dieser wird anschließend von einem Leseverstärker in ein Spannungssignal auf der Bitleitung umgesetzt.

Da der Lesevorgang wie bei DRAM zerstörerisch wirkt, muss nach jedem Lesevorgang ein Schreibvorgang folgen.

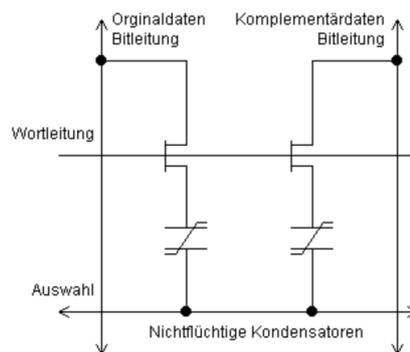


Abbildung 1: Aufbau einer FERAM Speicherzelle[4]

1

2.2 Vorteile

FERAM weist mit zehn Milliarden Schreib- und Lesezyklen eine sehr hohe Haltbarkeit auf und ist zu den elektrisch löschbaren Nur-Lese-Speichern EEPROMs kompatibel[4].

Der Stromverbrauch ist im Vergleich zu Flash-Speichern sehr gering. Außerdem beträgt die Schreibzeit circa 100 ns und entspricht somit der eines SRAMs[4].

2.3 Probleme

Die Kosten für FERAM sind mit 10000 Dollar pro Gigabyte im Vergleich zu anderen Speichertechniken nicht konkurrenzfähig[5]. Dazu kommt, dass die Zellen beispielsweise circa doppelt so groß sind wie DRAM-Zellen und somit erweist sich die Verkleinerung der Zellen als eine weitere Herausforderung[5].

Außerdem beschleunigen hohe Temperaturen den Verfall durch verschiedene Fehler. So bewirkt zum Beispiel die Depolarisierung, dass das Polarisierungslevel sinkt und

nicht mehr korrekt erkannt wird. Bei einem Imprint Fehler bleibt die Zelle in einem Polarisierungszustand gefangen[3].

2.4 Anwendung

Aufgrund ihres niedrigen Stromverbrauchs und der hohen Schreibgeschwindigkeit sind sie in der Lage die langsamen EEPROMS zu ersetzen. Zudem finden sie Anwendung sowohl in der Automobilelektronik als auch in mobiler und tragbarer Elektronik, beispielsweise in Chip-Karten oder RFID-Etiketten[4].

3 MRAM

3.1 Aufbau und Funktion

MRAM entspricht der Abkürzung Magnetoresistive Random Access Memory und speichert Informationen mit elektrischen Ladungselementen, da diese ihren elektrischen Widerstand unter dem Einfluss magnetischer Felder ändern können. Die favorisierte Technik für MRAM-Zellen ist der Wirkmechanismus des Magnetischen Tunnelwiderstands[6]. Dabei gibt es verschiedene Arten für den Aufbau einer MRAM-Zelle. Zu den Gebräuchlichsten gehören die Toggle-Write-MRAM-Zelle und die Spin-Transfer-Torque-Zelle.

3.2 Toggle-Write-MRAM

Die Zelle basiert auf einem Feldeffekttransistor, bei dem nur ein Ladungstyp am elektrischen Strom beteiligt ist. Der magnetische Tunnelkontakt(MTK) sitzt darüber und beschreibt ein spintronisches Bauelement, welches den Effekt des Magnetischen Tunnelwiderstandes ausnutzt(Vergleiche Abbildung 3).

Das Magnetfeld der Write-Leitung steuert die Spin-Magnetisierung der ferromagnetischen Schicht des MTK. Die Richtung der Spin-Magnetisierung hängt dementsprechend von der Flussrichtung des Stromes in der Write-Leitung ab.

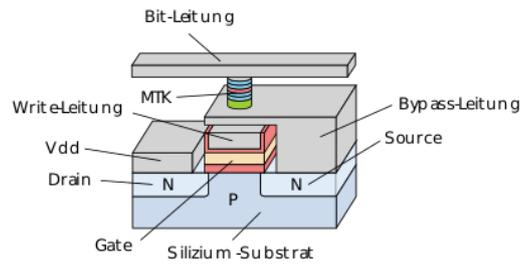


Abbildung 2: Aufbau einer Toggle-Write MRAM Zelle[6]

2

3.3 Spin-Transfer-Torque MRAM

Bei STT-MRAM wird die Spin-Magnetisierung der ferromagnetischen Schicht des MTK nicht über die Write-Leitung wie bei einem Toggle-Write-MRAM gespeichert, sondern geschieht durch Spin-polarisierte Elektronen direkt über die Source-Leitung[6].

Die Zellen bestehen aus einem magnetischen Tunnelübergang und einem Schalttransistor. Der magnetische Tunnelübergang setzt sich zusammen aus zwei magnetischen Schichten, zwischen denen eine nichtmagnetische Schicht liegt, die für die Elektronen als Tunnelverbindung fungiert. Eine der magnetischen Schicht hat eine festgesetzte Magnetisierungsrichtung, während sich bei der anderen diese ändern lässt.

Die Spin-Ausrichtung der ferromagnetischen Schicht wird durch das Spin-Moment der Elektronen beeinflusst.

Beim Lesevorgang wird die unterschiedliche Leitfähigkeit gemessen. So steht ein paralleler Spin für niedrigen und antiparalleler Spin für hohen Widerstand. Gespeichert werden die Informationen, indem die Spinausrichtung durch einen Stromstoß dauerhaft verändert wird.

Ein Vorteil dieser Technik gegenüber der Toggle-Write-MRAM-Zellen zeigt sich in ihrer kompakten Bauweise, da diese höhere Speicherkapazitäten ermöglicht.

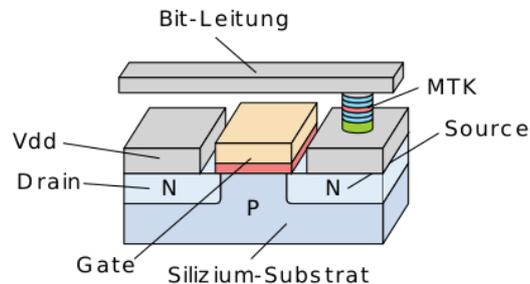


Abbildung 3: Aufbau einer Spin-Transfer-Torque MRAM Zelle[6]

3

3.4 Vorteile

Da MRAM-Speicher über hohe Schaltgeschwindigkeiten verfügen, verbrauchen sie sehr wenig Energie und weisen eine geringe Wärmeentwicklung auf[7]. Dazu haben sie im Vergleich zu beispielsweise Flash-Speichern eine sehr hohe Haltbarkeit.

3.5 Probleme

Auch wenn die MRAM-Speicherzellen deutlich weniger Platz auf dem Chip benötigen als beispielsweise SRAM- oder DRAM-Zellen, entsteht gleichzeitig ein Problem. Denn der hohe Schreibstrom zur Magnetisierung beeinflusst benachbarte Zellen durch magnetische Kopplung[7]. Sind zwei oder mehrere elektrische Stromkreise räumlich benachbart, dann beeinflussen sie sich magnetisch gegenseitig. Dies erweist sich als Hindernis für eine hohe Integrationsdichte und führt dazu, dass hohe Speicherkapazitäten wirtschaftlich nicht produzierbar sind[7].

Zudem haben MRAM-Zellen eine vergleichsweise hohe Ausfallrate, da bereits atomgroße Fehler zum Kurzschluss führen können[6]. Dies liegt daran, dass die magnetischen Tunnelkontakte extrem dünn gefertigt werden müssen, um den Effekt des magnetischen Tunnelwiderstands zu erzeugen.

3.6 Anwendung

Die hohen Kosten von MRAM-Zellen schränken das Einsatzgebiet stark ein. So findet MRAM nur in speziellen Gebieten Anwendung, beispielsweise in industriellen Systemen zur Verhinderung von kritischen Datenverlusten.

Durch die Strahlungsfestigkeit der Zellen finden sie zum Teil auch Anwendung in der Luft- und Raumfahrt oder in Waffensystemen[7].

4 ReRAM

4.1 Aufbau und Funktion

Die Zelle besteht aus normalerweise nicht leitenden Oxiden, wie beispielsweise aus Siliziumoxid (SiO_2) oder Hafniumdioxid (HfO_2).

Der Effekt äußert sich so, dass in diesen Oxiden ein oder mehrere elektrisch leitfähige Kanäle hergestellt werden. Beim Schreibvorgang kann durch das Anlegen verschiedener Spannungen in diesen Kanälen zwischen hoher und niedriger Leitfähigkeit hin- und hergeschaltet werden[8].

Durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Kanals wird die Zelle ausgelesen.

4.2 Anwendung

Die Vorteile von ReRAM-Zellen zeigen sich in ihrer hohen Haltbarkeit und Schnelligkeit gegenüber beispielsweise NAND-Flash. ReRAM ist jedoch noch nicht marktreif und aufgrund der hohen Kosten finden die Zellen bisher nur in speziellen Nischen Anwendung[9].

5 PCRAM

5.1 Aufbau und Funktion

Die Speichertechnik des Phase-change Random Access Memory basiert auf dem thermisch gesteuerten Phasenwechsel zwischen einem amorphen und einem kristallinen Zustands eines Materials. Gemessen wird dabei die Widerstandsänderung des Materials. Dieses Verfahren ähnelt der Datenspeicherung einer CD bzw. DVD,

jedoch wird dort der Reflektionsunterschied zur Abbildung der verschiedenen Zustände verwendet.

Zum Einsatz kommt beim PCRAM eine Chalkogenid-Legierung. Es beschreibt eine Verbindung aus Elementen der sechsten Hauptgruppe des Periodensystems, welche sowohl in amorpher als auch in kristalliner Phase bei Raumtemperatur stabil sind. Ein Material befindet sich im amorphen Zustand, wenn die Atome keine geordnete Struktur bilden. Im kristallinen Zustand sind die Atome hingegen regelmäßig strukturiert.

Die Speicherzelle ist meist in einer Matrix angeordnet und besteht aus einem Auswahltransistor und dem phasenwechselndem Element. Die Chalkogenid-Legierung liegt zwischen einer oberen und einer unteren Elektrode und ist an einem Heizer angelegt (Vergleiche Abbildung 5).

Um das Material zu amorphisieren, wird es durch den Heizer mit einem Strompuls mit höherer Stromstärke aber von geringer Dauer aufgeheizt. Anschließend kühlt das Material schnell ab und verbleibt somit im amorphen Zustand.

Für den Wechsel zurück in den kristallinen Zustand wird ein Strompuls von längerer Dauer aber geringere Stromstärke benötigt, damit das Material solange auf Temperatur gehalten wird bis Keimbildung und anschließend Kristallisierung einsetzt.

Zum Auslesen wird eine Spannung angelegt mit einer so geringen Stromstärke, sodass kein Phasenwechsel hervorgerufen wird. Abhängig vom Zustand fließt ein anderer Strom und der gemessene Widerstand unterscheidet sich um den Faktor 40 bis 100[11].



Abbildung 4: Aufbau einer PCRAM Zelle[10]

5.2 Probleme

Das größte Problem von PCRAM liegt in der zum Schreiben benötigte Stromstärke. Die Zelle muss möglichst hohe Kapazitäten bei gleichzeitig geringen Abmessungen liefern, um als Alternative zu etablierten Speichertechniken wie SRAM oder DRAM in Frage zu kommen. Deshalb müssen wichtige Bestandteile wie die MIS-Transistoren verkleinert werden, so dass sie weniger als hundert nm groß sind[10]. Dadurch verringert sich auch gleichzeitig die maximal mögliche Stromstärke, die jedoch für den Phasenwechsel benötigt wird.

5.3 Anwendung

PCRAM erweist sich als potentielle Alternative zu DRAM- und SRAM-Speichern, da es mit 75 ns eine hohe Schreibgeschwindigkeit aufweist, wenig Strom verbraucht und mit wenigen Dollarn pro Gigabyte dicht hinter den Preisen von DRAM mit einem Dollar pro Gigabyte liegt[5]. Dazu kommt es auch als Ersatz für Flash-Speicher in Frage, da es ebenfalls nichtvolatil ist und sich in Punkten wie Schreibgeschwindigkeit, Stromverbrauch und Haltbarkeit deutlich von beispielweise Flash-Speichern absetzt[5].

6 3D-XPoint

Der 3D-Xpoint ist eine nicht-flüchtige Speichertechnologie, die von Intel und Micron Technology in einem Jointventure entwickelt wurde[12].

Statt einem Transistor als Verbindungselement werden die Speicherzellen über eine dreidimensionale Kreuzmatrix miteinander verschaltet. Zur Speicherung der Informationen werden die Widerstandsänderungen eines Materials wie bei PCRAM gemessen. Für diese Technik hat Intel die Plattform Intel Optane geschaffen und bietet Produkte für verschiedene Zielgruppen wie Privatanutzer oder Rechenzentren an.

Der 3D-XPoint soll 1000 mal schneller und haltbarer als NAND Flash sein und zehn mal mehr Speicherkapazität als beispielsweise DRAM liefern[14].

Für Anfang 2019 hat Intel das Intel Optane Persistent Memory angekündigt, das speziell für das High Performance Computing entwickelt wird. Die nichtflüchtigen-DIMM Module sollen beispielsweise bis zu 512 Gigabyte Kapazität liefern[13].

Mit dem Intel Optane Memory soll der 3D-Xpoint auch für Privatanutzer zur Verfügung gestellt werden, wobei der Fokus dabei auf beschleunigtes Gaming und das schnellere Laden von Inhalten liegt[15].

7 Schlussfolgerung

Da sich der Datenfluss ständig erhöht, könnten im Bereich des High Performance Computing mechanische Festplatten durch nicht-flüchtige Speicher ersetzt werden, um Stromkosten zu reduzieren und die Speicherkapazitäten zu erhöhen[16]. Besonders die Flash-Speicher weisen Haltbarkeits-, Integrations- und Performance-Probleme auf[16]. Hier zeigt sich PCRAM als potentielle Alternative für die Zukunft. Dafür muss jedoch weiter an einer Lösung gearbeitet werden, um die zum Schreiben benötigte Stromstärke zu reduzieren.

FERAM, MRAM und ReRAM sind bisher nur für Nischenanwendungen geeignet und spielen vorerst als Alternative für etablierte Speichertechniken keine Rolle.

Ob der 3D-XPoint die Erwartungshaltung beispielsweise in Form des Intel Optane Persistent Memory erfüllen kann, wird sich beim Release zeigen.

Intel und Micron beenden nach 2019 das Jointventure und treiben eigene Entwicklungen voran. Ein möglicher Grund dafür könnte sich aus den schlechten Verkaufszahlen der Intel Optane SSDs ergeben[17].

Etablierte Speichertechniken werden jedoch nicht so schnell verdrängt werden, da beispielsweise DRAM aufgrund der niedrigen Kosten, der langen Haltbarkeit und der hohen Schreibgeschwindigkeit weiterhin konkurrenzfähig bleibt.

Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/NVRAM>
- [2] https://de.wikipedia.org/wiki/Random-Access_Memory
- [3] https://de.wikipedia.org/wiki/Ferroelectric_Random_Access_Memory
- [4] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0610041.htm>
- [5] <https://www.electronicsspecifier.com/around-the-industry/patent-analysis-for-non-volatile-memories>
- [6] https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistive_Random_Access_Memory
- [7] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0807111.htm>
- [8] https://de.wikipedia.org/wiki/Resistive_Random_Access_Memory
- [9] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/1909161.htm>
- [10] https://de.wikipedia.org/wiki/Phase-change_Random_Access_Memory
- [11] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/1401031.htm>
- [12] https://de.wikipedia.org/wiki/3D_XPoint
- [13] (<https://www.intel.de/content/www/de/de/it-management/intel-it/it-managers/optane-ssds-fuer-hpc.html?wapkw=intel+optane>)
- [14] <https://www.mobilegeeks.de/artikel/intels-3d-xpoint-speicher-ist-1000-mal-schneller-als-ssds/>)
- [15] <https://www.intel.de/content/www/de/de/products/docs/memory-storage/optane-memory/gaming-with-intel-optane-memory.html>
- [16] Lüttgau, J., Kuhn M., Duwe, K., Alforov, Y., Betke, E., Kunkel, J., Ludwig, T. : Survey of Storage for High-Performance Computing: superfri.org, DOI: 10.14529/jsfi180103

- [17] https://www.theregister.co.uk/2018/07/18/3d_xpoint_issues_and_micron_intel_split/
- [18] https://wr.informatik.uni-hamburg.de/teaching/organisatorische_hinweiseproseminare
- [19] <https://www.storage-insider.de/was-ist-ein-stt-mram-a-658008/>