

Halbleitertechnologie von A bis Z

Digitaltechnik

MRAM - Magnetoresistive RAM	3
<i>Der tunnelmagnetoresistive Effekt (TMR)</i>	3
<i>Aufbau der Magnetic Tunnel Junction (MTJ)</i>	3
<i>STT-MRAM als heutige Standardvariante</i>	4
<i>Eigenschaften</i>	5

MRAM - Magnetoresistive RAM

Der tunnelmagnetoresistive Effekt (TMR)

MRAM speichert Information nicht über elektrische Ladung wie DRAM oder Flash, sondern über die magnetische Ausrichtung von Elektronenspins – ein grundlegend anderer physikalischer Speichermechanismus. Grundlage ist der tunnelmagnetoresistive Effekt (TMR), ein quantenmechanisches Phänomen: Zwei ferromagnetische Schichten, getrennt durch eine wenige Atomlagen dünne Isolatorschicht, lassen abhängig von ihrer relativen Magnetisierungsrichtung unterschiedlich viel elektrischen Strom durchtunneln. Elektronen tunneln bevorzugt dann durch die Isolatorschicht, wenn ihre Spin-Ausrichtung mit der Mehrheits-Spinausrichtung in beiden ferromagnetischen Schichten übereinstimmt.

Sind beide Schichten parallel magnetisiert (gleiche Ausrichtung), finden die meisten Elektronen einen passenden Zustand zum Durchtunneln, und der elektrische Widerstand der Zelle ist niedrig. Bei antiparalleler Ausrichtung (entgegengesetzte Magnetisierung) müssen die Elektronen ihren Spin beim Tunneln umkehren, was quantenmechanisch deutlich unwahrscheinlicher ist – der Widerstand steigt spürbar an, typischerweise um 100 bis 200 Prozent gegenüber dem parallelen Zustand (das sogenannte TMR-Verhältnis). Diese zwei klar unterscheidbaren Widerstandszustände codieren die Bits „0“ und „1“ und lassen sich durch einfaches Anlegen einer kleinen Lesespannung zerstörungsfrei auslesen.

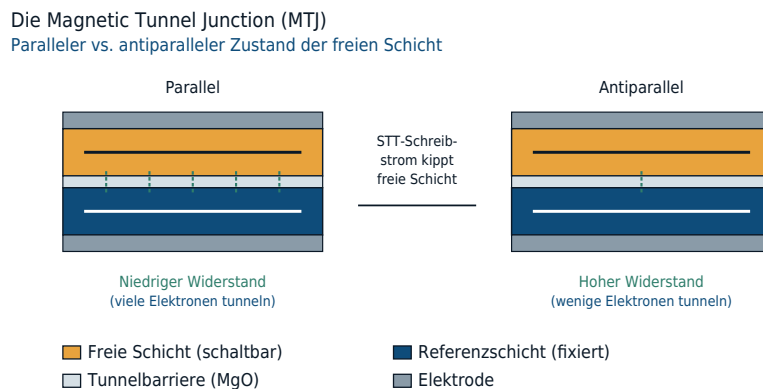
Aufbau der Magnetic Tunnel Junction (MTJ)

Die Speicherzelle – die Magnetic Tunnel Junction (MTJ) – besteht aus drei zentralen Schichten, die typischerweise mittels Sputtern (siehe PVD-Verfahren-Kapitel) in einer einzigen Vakuumkammer ohne Unterbrechung des Vakuums abgeschieden werden, um Oxidation und Verunreinigung an den empfindlichen Grenzflächen zu vermeiden:

Eine Referenzschicht (Fixed Layer oder Pinned Layer) aus einer ferromagnetischen Legierung, deren Magnetisierungsrichtung durch Kopplung an eine zusätzliche antiferromagnetische Schicht fest vorgegeben und gegen äußere Störfelder stabilisiert ist. Darüber eine hauchdünne Tunnelbarriere, in modernen MTJs praktisch ausnahmslos aus kristallinem Magnesiumoxid (MgO) mit einer Dicke von nur ein bis zwei Nanometern – die Kristallstruktur des MgO ist entscheidend für ein hohes TMR-Verhältnis, da sie eine spinselektive Tunnelwahrscheinlichkeit begünstigt. Und schließlich eine freie Schicht (Free

Layer), ebenfalls ferromagnetisch, deren Magnetisierungsrichtung sich zum Schreiben gezielt umschalten lässt. Nur die freie Schicht ändert beim Schreibvorgang ihren Zustand; die Referenzschicht dient als stabiler Vergleichspunkt, gegen den beim Auslesen der Widerstand gemessen wird.

MTJ im parallelen und antiparallelen Zustand



STT-MRAM als heutige Standardvariante

Frühe MRAM-Generationen (Toggle-MRAM) schalteten die freie Schicht über ein extern angelegtes Magnetfeld um, erzeugt durch stromdurchflossene Leiterbahnen oberhalb und unterhalb der Zelle. Dieses Verfahren benötigte vergleichsweise hohe Schreibströme im Milliampere-Bereich und wurde mit sinkender Zellgröße zunehmend unpraktikabel, da sich Magnetfelder nicht beliebig auf einzelne, dicht benachbarte Zellen begrenzen lassen (Übersprechen auf Nachbarzellen).

Die heute dominante und in allen aktuellen Produkten verwendete Variante ist STT-MRAM (Spin-Transfer Torque MRAM): Hier wird ein spinpolarisierter Strom direkt durch den Schichtstapel der MTJ geleitet, senkrecht zu den Schichtebenen. Beim Durchqueren der Referenzschicht wird der Strom spinpolarisiert; erreichen diese spinpolarisierten Elektronen anschließend die freie Schicht, übertragen sie ihren Spin-Drehimpuls durch einen quantenmechanischen Effekt namens Spin-Transfer-Torque auf die dortigen Elektronen und üben ein Drehmoment aus, das bei ausreichender Stromstärke die Magnetisierung der freien Schicht umkippt – vollständig ohne externes Magnetfeld. Da der Schreibstrom direkt durch die zu schaltende Zelle selbst fließt, lässt sich der Effekt sehr präzise auf einzelne Zellen begrenzen, was STT-MRAM deutlich energieeffizienter, störungsunempfindlicher und vor allem besser skalierbar macht als ältere feldbasierte Ansätze.

Eigenschaften

MRAM vereint mehrere vorteilhafte Eigenschaften, die es unter den nichtflüchtigen Speichertechnologien einzigartig positionieren: Es ist nichtflüchtig wie Flash – die Magnetisierungsrichtung bleibt ohne Energiezufuhr über Jahre stabil erhalten –, erreicht aber Schreib- und Lesezeiten im Bereich weniger Nanosekunden und damit eine Geschwindigkeit, die mit SRAM vergleichbar und DRAM zumindest nahekommt. Die Endurance liegt bei über 10^{12} Schreibzyklen und übertrifft NAND-Flash damit um vier bis fünf Größenordnungen, da der Schreibvorgang rein magnetisch erfolgt und – anders als bei Flash – keine strukturelle Degradation eines Tunneloxids verursacht.

Der begrenzende Faktor ist aktuell die Zelldichte: Eine MTJ-Zelle benötigt zusammen mit ihrem Zugriffstransistor deutlich mehr Fläche als eine vergleichbare Flash-Zelle, und die Schreibströme, so gering sie im Vergleich zu Toggle-MRAM auch sind, begrenzen weiterhin, wie klein und wie dicht gepackt einzelne MTJs praktikabel gefertigt werden können. Aus diesen Gründen wird MRAM bislang vor allem als schneller Cache-Ersatz (etwa als Level-3- oder Level-4-Cache in Prozessoren), als Ersatz für batteriegepuffertes SRAM in Industrie- und Automotive-Steuergeräten sowie in Anwendungen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen eingesetzt – nicht als Massenspeicher im Sinne einer SSD.