

Halbleitertechnologie von A bis Z

Digitaltechnik

ReRAM - Resistive RAM	3
<i>Das Prinzip der Filamentbildung</i>	3
<i>Set- und Reset-Vorgang</i>	3
<i>Materialsysteme</i>	4
<i>Eigenschaften und Herausforderungen</i>	4

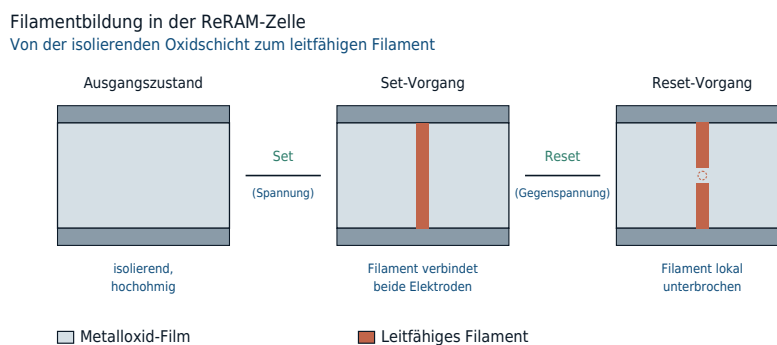
ReRAM - Resistive RAM

Das Prinzip der Filamentbildung

ReRAM speichert Information über den elektrischen Widerstand eines dünnen Metalloxidfilms, der zwischen zwei Elektroden eingebettet ist – eine Struktur, die aufgrund ihrer Einfachheit oft als „MIM-Struktur“ (Metal-Insulator-Metal) bezeichnet wird. Im Ausgangszustand nach der Fertigung ist dieser Oxidfilm weitgehend isolierend und homogen. Durch Anlegen einer ausreichend hohen Spannung im sogenannten Forming-Schritt (einmalig bei der ersten Aktivierung der Zelle) wandern Sauerstoff-Leerstellen innerhalb des Oxidgitters – bei anderen Materialsystemen alternativ Metallionen aus einer der Elektroden – entlang des elektrischen Feldes und ordnen sich zu einem dünnen, leitfähigen Pfad an: einem sogenannten Filament, oft nur wenige Nanometer im Durchmesser. Dieses Filament überbrückt die isolierende Schicht lokal und senkt den Widerstand der Zelle an dieser Stelle drastisch, während der übrige Oxidfilm isolierend bleibt.

Physikalisch handelt es sich dabei um einen elektrochemischen Vorgang: Die Sauerstoff-Leerstellen wirken als positiv geladene Defekte im Oxidgitter (da an der jeweiligen Gitterposition ein negativ geladenes Sauerstoffion fehlt) und lassen sich durch ein elektrisches Feld gezielt bewegen, ganz ähnlich der Ionenmigration in einem Festkörperelektrolyten. Diese Eigenschaft – Widerstandsänderung durch Ionenbewegung statt durch Ladungsspeicherung – unterscheidet ReRAM grundlegend von Flash und rückt es in die Nähe memristiver Bauelemente.

Filamentbildung: Ausgangszustand, Set und Reset



Set- und Reset-Vorgang

Das Erzeugen beziehungsweise Verstärken des leitfähigen Filaments wird als Set-Vorgang bezeichnet und schaltet die Zelle vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand („1“). Durch Anlegen einer Spannung mit umgekehrter Polarität lässt sich das Filament an seiner schwächsten Stelle wieder teilweise auflösen, indem die Sauerstoff-Leerstellen zurückwandern und lokal eine dünne isolierende Lücke im Filament entsteht – der Reset-Vorgang, der die Zelle zurück in den hochohmigen Zustand („0“) versetzt. Bemerkenswert ist, dass beim Reset in der Regel nicht das gesamte Filament aufgelöst wird, sondern nur ein kurzer Abschnitt – ein energetisch günstigerer und schnellerer Vorgang, als das Filament komplett neu aufzubauen.

Da beide Vorgänge, Set wie Reset, rein auf der Bewegung von Ionen beziehungsweise Leerstellen im Festkörper beruhen und keine mechanische oder elektrische Belastung eines Tunneloxids wie bei Flash verursachen, sind sie prinzipiell schneller (Schaltzeiten im Nanosekundenbereich sind in Forschungsergebnissen demonstriert) und schonender für die Zelle als das Fowler-Nordheim-Tunneln bei Flash.

Materialsysteme

Die gebräuchlichsten Materialsysteme für den resistiven Film sind Übergangsmetalloxide wie Hafniumoxid (HfO_2), Titanoxid (TiO_2) und Tantaloxid (Ta_2O_5) – Materialien, die bereits aus der High-k-Dielektrika-Fertigung bekannt sind (siehe Kapitel zu Verbindungshalbleitern und High-k-Materialien) und sich dadurch vergleichsweise einfach und ohne exotische neue Precursoren in bestehende CMOS-Prozesslinien integrieren lassen, typischerweise mittels Atomic Layer Deposition (siehe ALD-Kapitel) für präzise Schichtdickenkontrolle im Nanometerbereich. Als Elektrodenmaterialien kommen häufig Platin, Titannitrid oder andere inerte beziehungsweise leicht oxidierbare Metalle zum Einsatz, je nachdem ob eine Elektrode gezielt als Sauerstoff-Reservoir dienen soll.

Eigenschaften und Herausforderungen

ReRAM-Zellen sind strukturell außerordentlich einfach aufgebaut: im einfachsten Fall lediglich eine Kreuzungsstelle zwischen zwei senkrecht zueinander verlaufenden Leiterbahnen mit dazwischenliegendem Oxidfilm (eine sogenannte Crossbar-Architektur). Dadurch lassen sie sich potenziell sehr dicht und kostengünstig fertigen – die theoretische Zellgröße nähert sich der kleinstmöglichen Fläche an, die die Kreuzung zweier minimal breiter

Leiterbahnen einnimmt ($4F^2$, wobei F die minimale Strukturbreite ist). Zudem erlaubt die einfache Struktur den Aufbau mehrlagiger 3D-Stapel, bei denen mehrere Crossbar-Ebenen übereinander gefertigt werden, um die Speicherdichte pro Chipfläche weiter zu vervielfachen.

Die größte Herausforderung ist die Variabilität: Die Filamentbildung ist ein stochastischer Prozess auf atomarer Ebene, bei dem sich Anzahl, Position und genaue Geometrie der beteiligten Sauerstoff-Leerstellen von Zelle zu Zelle und selbst von Schreibzyklus zu Schreibzyklus innerhalb derselben Zelle unterscheiden. Das führt zu spürbaren Schwankungen der resultierenden Widerstandswerte (Cycle-to-Cycle- und Device-to-Device-Variability), was zuverlässiges Auslesen bei hoher Bitdichte erschwert und aufwendigere Leseschaltungen mit adaptiven Referenzwerten erfordert. Zusätzlich stellt das Crosstalk-Problem in großen Crossbar-Arrays (Sneak-Path-Ströme über benachbarte, eigentlich nicht angesprochene Zellen) eine architektonische Herausforderung dar, die häufig durch zusätzliche Selektor-Elemente pro Zelle adressiert wird. Beides ist Gegenstand aktiver Forschung und einer der Hauptgründe, warum ReRAM bislang seltener in Großserie gefertigt wird als MRAM oder PCM.