

Halbleitertechnologie von A bis Z

Digitaltechnik

PCM - Phase-Change Memory	3
<i>Amorpher vs. kristalliner Zustand als Speicherprinzip</i>	3
<i>Das Chalkogenid-Material GST</i>	3
<i>Schreiben durch Aufheizen und Abschrecken</i>	3
<i>Intel Optane als bekanntestes Beispiel</i>	4

PCM - Phase-Change Memory

Amorpher vs. kristalliner Zustand als Speicherprinzip

Phase-Change Memory nutzt eine grundlegend andere physikalische Eigenschaft aus als die bislang behandelten Technologien: bestimmte Materialien lassen sich gezielt und reversibel zwischen einem ungeordneten (amorphen) und einem geordneten (polykristallinen) Zustand umschalten, deren atomare Strukturen sich in ihrem elektrischen Widerstand um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Im amorphen Zustand sind die Atome regellos angeordnet wie in einer eingefrorenen Flüssigkeit, was den Ladungstransport durch Streuung an der ungeordneten Struktur stark behindert – der elektrische Widerstand ist hoch, dieser Zustand codiert eine „0“. Im kristallinen Zustand bilden die Atome ein regelmäßiges Gitter, das den Ladungstransport deutlich erleichtert – der Widerstand ist niedrig, dieser Zustand codiert eine „1“. Das Widerstandsverhältnis zwischen beiden Zuständen liegt typischerweise bei mehreren Größenordnungen, was ein sehr robustes und fehlertolerantes Ausleseverfahren ermöglicht.

Das Chalkogenid-Material GST

Das mit Abstand am häufigsten verwendete Material ist eine Legierung aus Germanium, Antimon und Tellur im ungefähren Verhältnis $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, kurz GST genannt. GST gehört zur Materialklasse der Chalkogenide (Verbindungen mit den Elementen der 6. Hauptgruppe wie Schwefel, Selen oder Tellur) und hat die für die Speicheranwendung entscheidende Eigenschaft, dass sich der Phasenübergang zwischen amorph und kristallin sehr schnell (im Nanosekundenbereich) und sehr oft reversibel durchführen lässt, ohne dass sich die chemische Zusammensetzung des Materials dabei verändert – im Gegensatz etwa zu elektrochemischen Vorgängen bei Batterien, bei denen Materialermüdung durch chemische Umwandlung eine zentrale Alterungsursache ist. Die Kristallisationstemperatur von GST liegt bei rund 150 bis 200 °C, deutlich unterhalb des Schmelzpunkts, was ein kontrolliertes, thermisch induziertes Umschalten erlaubt, ohne dass die Zelle bei normalen Betriebstemperaturen ungewollt ihren Zustand ändert.

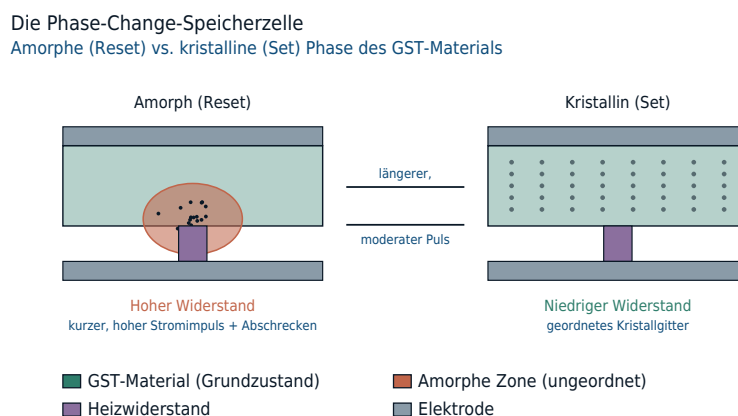
Schreiben durch Aufheizen und Abschrecken

Der Phasenwechsel wird rein thermisch ausgelöst, üblicherweise durch einen kleinen Heizwiderstand, der in unmittelbarem Kontakt mit dem GST-Volumen

steht. Für den amorphen Zustand („Reset“) erhitzt ein kurzer, hoher Stromimpuls (im Bereich weniger Nanosekunden) das GST lokal über seinen Schmelzpunkt von rund 600 °C und lässt es anschließend extrem schnell abkühlen („abschrecken“, engl. Quenching) – die Abkühlrate liegt bei mehreren Hundert Millionen Kelvin pro Sekunde. Dabei bleibt den Atomen keine Zeit, sich in einem geordneten Kristallgitter anzuordnen, und das Material erstarrt im ungeordneten, amorphen Zustand.

Für den kristallinen Zustand („Set“) wird demgegenüber ein längerer (typischerweise einige Zehn bis Hundert Nanosekunden), aber in der Amplitude moderaterer Stromimpuls verwendet, der das Material über die Kristallisationstemperatur, aber deutlich unterhalb des Schmelzpunkts hält. Dies gibt den Atomen ausreichend Zeit, sich durch thermisch aktivierte Diffusion in ein regelmäßiges Kristallgitter einzuordnen. Die Präzision dieser Heiz- und Abkühlprofile – exakte Stromhöhe, Pulsdauer und Flankensteilheit – bestimmt maßgeblich Geschwindigkeit, Energieverbrauch und Zuverlässigkeit der Zelle und stellt hohe Anforderungen an die Ansteuerungselektronik.

PCM-Zelle im amorphen und kristallinen Zustand



Intel Optane als bekanntestes Beispiel

Die kommerziell bekannteste Umsetzung von PCM-Technologie war Intel Optane, basierend auf der gemeinsam mit Micron entwickelten 3D-XPoint-Technologie, die 2015 vorgestellt wurde. Optane positionierte sich exakt in der eingangs beschriebenen Storage-Class-Memory-Lücke: als SSD deutlich schneller als NAND-Flash-basierte Laufwerke (insbesondere bei kleinen, zufälligen Schreibzugriffen und niedriger Latenz), und in einer separaten Produktvariante sogar direkt als Erweiterung des Arbeitsspeichers ansprechbar

(Optane Persistent Memory), was DRAM-ähnliche Zugriffsmuster bei gleichzeitiger Nichtflüchtigkeit ermöglichte – zu geringeren Kosten pro Bit als DRAM und mit deutlich höherer Kapazität pro Speicherriegel.

Trotz dieser technischen Alleinstellungsmerkmale stellte Intel die gesamte Optane-Produktlinie im Jahr 2022 aus wirtschaftlichen Gründen ein: Die Fertigungskosten blieben hoch, der Markt für die Nischenanwendung entwickelte sich langsamer als erhofft, und mit zunehmend schnelleren NAND-Flash-Generationen (insbesondere durch NVMe- und PCIe-Anbindungen mit immer höherer Bandbreite) verringerte sich der relative Geschwindigkeitsvorteil von Optane gegenüber konventionellen SSDs. Ein anschauliches Beispiel dafür, dass technische Überlegenheit allein am Markt nicht immer ausreicht, wenn sich die Konkurrenztechnologie schneller weiterentwickelt als erwartet und die Zielanwendung eine kritische Masse an Kunden nicht erreicht.