

Franz Müller
Charakterisierung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren und
Anwendung in Speicherfeldern für In-Memory-Computing

Band 94

Franz Müller

**Charakterisierung ferroelektrischer
Feldeffekttransistoren und
Anwendung in Speicherfeldern für
In-Memory-Computing**

TUD*press*

2025

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Charakterisierung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren und Anwendung in Speicherfeldern für In-Memory-Computing“ am 02. Mai 2024 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 4. November 2024 verteidigt.

Vorsitzender: Prof. Dr. Ronald Tetzlaff (TU Dresden)

Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach (TU Dresden)
 Prof. Dr. rer. nat. Yvonne Joseph (TU Bergakademie Freiberg)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-810-7

© TUDPress
Thelem Universitätsverlag und
Buchhandlung GmbH & Co. KG
Dresden und München
Tel.: 0351/472 14 63 | Fax: 0351/479 69 721
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Gesetzt vom Autor.
Printed in Germany.

Vorwort des Herausgebers

Die Mikroelektronik ist eine industrielle Basistechnologie, die mit ihren Bauelementen viele andere industrielle Technologien überhaupt erst ermöglicht. Umsätze in der Halbleiterbranche haben eine große Hebelwirkung, so dass die darauf basierenden Umsätze in der Industrie um den Faktor 20...100 größer sind. Schätzungen von Branchenverbänden zufolge stammen etwa 10 % des weltweiten BIP aus Technologien, die auf Halbleitern basieren.

Eine wichtige Klasse von mikroelektronischen Bauelementen sind nichtflüchtige Speicher. Nachdem die Gruppe um Böске (Qimonda) und Müller (Fraunhofer CNT bzw. IPMS) in Zusammenarbeit mit NaMLab im Jahr 2011 nachweisen konnte, dass in dünnen Schichten aus SiO₂-dotiertem Hafniumoxid (Si:HfO₂) kristalline Phasen mit ferroelektrischem Verhalten entstehen (Ferroelectricity in hafnium oxide thin films. Applied Physics Letters 99, 2011, 102903) und diese CMOS-kompatibel sind, haben ferroelektrische Materialien erneut verstärkt das Interesse der Forschung geweckt. Bereits in jener ersten Veröffentlichung zu ferroelektrischem Hafniumoxid wurde vorausgesagt, dass dieses Material die Basis nicht nur für nichtflüchtige Speicher in der Mikroelektronik, sondern auch für viele andere Bauelemente sein könnte.

Herr Müller hat sich in seiner Dissertation nun mit ferroelektrischen Feldeffekttransistoren (FeFETs) beschäftigt, bei denen das Hafniumoxid im Gate-Stapel integriert ist. Die nichtflüchtige Speicherinformation wird durch die Polarisationsrichtung beschrieben, die für eine Modulation des Ladungstransports im Transistorkanal sorgt. Er untersucht dabei sowohl für einzelne FeFETs als auch FeFET-Speicherfelder deren Speicherverhalten. Dabei leitet er ein Perkulationsstrompfad-Modell ab, mit dem sich das Schaltverhalten qualitativ beschreiben lässt. Dieses Modell erlaubt es ihm dann, die experimentellen Ergebnisse zur Charakterisierung der FeFETs hinsichtlich Schaltverhalten, Datenhaltung, Zyklenfestigkeit und Zellvariabilität zu erklären. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Arbeit besteht außerdem in der Untersuchung, inwieweit sich mehr als nur zwei Zustände pro FeFET adressieren lassen. Dies würde die Nutzung solcher Speicherfelder für das Rechnen direkt im Speicher, das In-Memory-Computing, ermöglichen. Mit allen diesen Fragen widmet sich die vorgelegte Arbeit von Herrn Müller außerordentlich wichtigen wissenschaftlich-technischen Fragestellungen auf dem Gebiet CMOS-kompatibler nichtflüchtiger Speicher und Bauelemente. Die Ergebnisse haben eine große wissenschaftliche Relevanz, könnten

perspektivisch aber auch für eine wirtschaftliche Nutzung Bedeutung erlangen. Dieser Band der „Dresdner Beiträge zur Sensorik“ leistet damit einen außerordentlich wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung dieses Fachgebiets. Aus diesem Grund wünsche ich dieser Arbeit eine große Aufmerksamkeit!

Dresden, im Januar 2025
Gerald Gerlach



Charakterisierung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren und Anwendung in Speicherfeldern für In-Memory-Computing

Franz Müller

Geboren am: 25. Mai 1992 in Meerane

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach

Prof. Dr. rer. nat. Yvonne Joseph

Eingereicht am: 2. Mai 2024

Verteidigt am: 4. November 2024



Kurzfassung

Die Entdeckung der Ferroelektrizität in Hafniumoxid hat das Interesse an nichtflüchtigen ferroelektrischen Speichern neu entfacht, da damit hochskalierbare Speicherelemente unter Verwendung dieses CMOS-kompatiblen Materials möglich werden. Ein vielversprechender Bauelement-Typ sind ferroelektrische Feldeffekttransistoren, bei denen das Hafniumoxid im Gate-Stapel integriert ist. Die nichtflüchtige Speicherinformation wird durch die Polarisationsrichtung beschrieben, die für eine Modulation des Ladungstransports im Transistorkanal sorgt. Neben dem Einsatz in nichtflüchtigen Speichern sind auch neuromorphe Anwendungen, d.h. das Rechnen nach dem Vorbild neuronaler Netze und Strukturen, von großem Interesse. Hier kommt das Rechnen im Speicher, das sogenannte In-Memory-Computing, zum Einsatz.

Obwohl Speicher auf der Basis von Hafniumoxid ein großes Potenzial für solche neuartigen Anwendungen haben, sind die Materialeigenschaften noch nicht vollständig verstanden, so dass die Technologie bisher noch keine Marktreife erreicht hat.

Deshalb werden in dieser Arbeit die elektrischen Eigenschaften und Zuverlässigkeitsparameter von ferroelektrischen Feldeffekttransistoren auf der Basis von Hafniumoxid untersucht. Ausgehend von der elektrischen Charakterisierung und der Analyse der Materialparameter von Hafniumoxid wird ein Simulationsmodell vorgestellt, bei dem das Schaltverhalten der ferroelektrischen Feldeffekttransistoren durch Perkulationsstrompfade erklärt wird. Auf Basis des Modells werden der Einfluss der geometrischen Skalierung, der Einfluss von Materialparametern und deren Variation sowie der Einfluss von Perkulationspfaden auf wesentliche Speicherparameter wie Datenerhalt und Zyklenfestigkeit analysiert. Die Erkenntnisse aus den Einzelzellanalysen und Simulationsergebnissen werden auf die Ansteuerung von AND-verknüpften Speicherfeldern übertragen. Durch geeignete Schreib- und Schutzschemata wird eine Multilevel-Ansteuerung der ferroelektrischen Feldeffekttransistoren auf Speicherfeldebene demonstriert. Dies erlaubt nun den Einsatz ferroelektrischer Feldeffekttransistoren in neuromorphen Anwendungen, die abschließend untersucht werden. Dazu werden verschiedene Anwendungsfelder wie In-Memory-Computing und Hardware-basierte neuronale Netze betrachtet.



Abstract

The discovery of ferroelectricity in hafnium oxide has reignited interest in nonvolatile ferroelectric memories, as it raises the prospect of highly scalable memory devices using this CMOS-compatible material. One promising device type is ferroelectric field-effect transistors, in which the hafnium oxide is integrated into the gate stack. The nonvolatile memory information is described by the polarization direction, which provides modulation of the charge transport in the transistor channel. In addition to the use in nonvolatile memories, neuromorphic applications, i.e. the mapping of neural networks and structures, are also of great interest. This is where in-memory computing comes into play.

Although memories based on hafnium oxide have great potential for such novel applications, the material properties are not yet fully understood, so the technology has not yet reached market maturity.

Therefore, the electrical characteristics and reliability parameters of ferroelectric field-effect transistors based on hafnium oxide are investigated in this work. Based on the electrical characterization and material parameter analysis of hafnium oxide, a simulation model is presented to show the current percolation path based switching behavior of the ferroelectric field effect transistors. Based on the model, the influence of geometric scaling, the influence of material parameters and their variation, and the influence of percolation paths on key memory parameters such as data retention and cycle endurance are analyzed. The findings from the single-cell analyses and simulation results are transferred to the control of AND-connected memory arrays. Multilevel control of ferroelectric field-effect transistors at the memory array level is demonstrated by suitable write and inhibit schemes. This opens up possibilities for the use of ferroelectric field-effect transistors in neuromorphic applications, which will be finally investigated. As a result, different application areas such as in-memory computing and hardware-based neural networks are investigated.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung/Abstract	iii
Symbolverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Ferroelektrische Speicher: Stand der Technik	7
2.1 Materialien für ferroelektrische Speicher	7
2.2 Etablierte ferroelektrische Speicherkonzepte	10
2.2.1 Ferroelektrischer RAM	11
2.2.2 Ferroelektrischer Feldeffekttransistor	12
2.2.3 Ferroelektrische Tunnelzelle	13
2.2.4 Schlussfolgerungen und Zielstellung dieser Arbeit	14
3 Grundlagen ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	17
3.1 Aufbau	17
3.2 Herstellung	19
3.3 Herausforderungen	22
3.3.1 Bauelement-Ebene	22
3.3.2 Speicherfeld-Ebene	24
3.4 Vorhandene ferroelektrische Modelle	24
3.4.1 Simulation ferroelektrischer Materialien	25
3.4.2 Simulation auf Bauteilebene	28
3.4.3 Fazit	29
4 Methoden und Charakterisierung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	31
4.1 Messaufbau zur Charakterisierung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	31
4.1.1 Vorhandene Teststrukturen und Messgeräte	32
4.1.2 Anforderungen an Messaufbau	33
4.1.3 Realisierung durch individuelle Schaltmatrix	33
4.1.4 Ansteuerung des Messplatzes	37
4.2 Schaltverhalten	38
4.2.1 Methodik	38
4.2.2 Ergebnisse und Diskussion	41

4.3	Datenhaltung	46
4.3.1	Methodik	46
4.3.2	Ergebnisse und Diskussion	47
4.4	Zyklusfestigkeit	50
4.4.1	Methodik	50
4.4.2	Ergebnisse und Diskussion	50
4.5	Fazit	53
5	Modell für das Perkulationsverhalten ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	55
5.1	Mikrostruktur polykristalliner ferroelektrischer Schichten	55
5.2	Modellaufbau	58
5.2.1	Modellanforderungen, Vereinfachungen und Annahmen	58
5.2.2	Abbildung der ferroelektrischen Dünnschicht	59
5.2.3	Ermittlung und Gewichtung der Perkulationsstrompfade	61
5.2.4	Monte-Carlo-Simulation	64
5.3	Einfluss von Perkulationsstrompfaden auf das Schaltverhalten	66
5.3.1	Prinzipielles Verhalten und Vergleich mit Messdaten	66
5.3.2	Realdatensimulation	67
5.3.3	Einfluss der Orientierungswinkelverteilung und Korngröße	68
5.3.4	Fazit	70
5.4	Einfluss von Perkulationsstrompfaden auf die Variabilität	70
5.4.1	Einfluss der räumlichen Anordnung ferroelektrischer Körner	70
5.4.2	Einfluss der Flächenskalierung bei großen Körnern	71
5.4.3	Einfluss der Flächenskalierung bei kleinen Körnern	74
5.4.4	Fazit	75
5.5	Einfluss von Perkulationsstrompfaden auf die Datenhaltung	75
5.5.1	Einfluss des Depolarisationsfeldes	75
5.5.2	Simulationsablauf	76
5.5.3	Ergebnisse	76
5.5.4	Fazit	78
5.6	Einfluss von Perkulationsstrompfaden auf die Zyklusfestigkeit	78
5.6.1	Einfluss von Defekten	78
5.6.2	Simulationsablauf	79
5.6.3	Ergebnisse	80
5.6.4	Fazit	80
5.7	Fazit	81
5.7.1	Ergebnisse	81
5.7.2	Limitierungen und Erweiterungsmöglichkeiten	82
6	AND-verknüpfte ferroelektrische Speicherfelder	85
6.1	Aufbau von Speicherfeldern	85
6.2	Schaltverhalten im Speicherfeld	88
6.3	Selektive Ansteuerung im Speicherfeld	91
6.3.1	Ansteuerprinzip	91
6.3.2	Schutz nicht-selektierter ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	94
6.3.3	Multilevel-Ansteuerung ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	96
6.4	Fazit	101
7	Alternative Anwendungsbereiche ferroelektrischer Feldeffekttransistoren	105
7.1	Einordnung der Anwendungsfelder	106
7.1.1	Von-Neumann-Architektur	106
7.1.2	In-Memory-Computing	106

7.1.3	Logic-in-Memory	107
7.1.4	Neuromorphes Rechnen	107
7.1.5	Hyperdimensionales Rechnen	107
7.1.6	Multiplizieren-Akkumulieren-Rechnen	108
7.1.7	Assoziativspeicher	108
7.2	Hardware-basierte Neuronale Netze	108
7.3	Rechentechnik - Assoziativspeicher	110
7.4	Rechenoperation – Multiplizieren-Akkumulieren	115
7.5	Weitere Anwendungsfelder	118
8	Zusammenfassung	119
8.1	Inhalte der Arbeit	119
8.2	Perkolationsstrompfade in ferroelektrischen Feldeffekttransistoren	119
8.3	Speicherfelder und deren Multilevel-Betrieb	120
8.4	In-Memory-Computing	121
8.5	Fazit	121
	Publikationen	146
	Danksagung	153
	Selbstständigkeitserklärung	155

Symbolverzeichnis

A	2D-Matrix ($m \times n$) zur Beschreibung einer ferroelektrischen Schicht
A_{FE}	Fläche der ferroelektrischen Kapazität
A_{ij}	ferroelektrisches Korn in der Matrix A in Zeile i und Spalte j
A_T	Transistorfläche
B	Breite
C_{FE}	Kapazität des Ferroelektrikums
C_{IF}	Kapazität der Grenzflächenschicht
d_{FE}	Dicke des Ferroelektrikums
d_F	Dicke der ferroelektischen Schicht
d_{IF}	Dicke der Grenzflächenschicht
E_a	elektrische Aktivierungsfeldstärke
E_{ch}	elektrische Feldstärke im Transistorkanal
E_C	Koerzitivfeldstärke
E_{dep}	Depolarisationsfeldstärke
E_e	Energie
E_f	elektrische Feldstärke
E_{gate}	am Gate anliegende Feldstärke
E_m	mittlere benötigte Schaltfeldstärke
I_D	Drainstrom
I_{off}	Aus-Strom eines FeFET
I_{on}	Ein-Strom eines FeFET
I_R	Lesestrom

Symbolverzeichnis

I_T	Schwellstrom
k	Anzahl der Iterationen
K_b	Boltzmann-Konstante
L'_W	normalisierte Liste der minimalen Gewichte L_W
L	Länge
L_W	Liste der Mindestgewichte des Perkulationspfades, eines für jede Iteration
m	Anzahl der Zeilen der Matrix A
M_j	maximal mögliches Gewicht eines Perkulationspfades
MW	Memory Window
n	Anzahl der Spalten der Matrix A
P	Polarisation
P_{FE}	Polarisation des Ferroelektrikums
P_R	remanente Polarisation
P_{spt}	spontane Polarisation
P_S	Sättigungspolarisation
R	Widerstand
T	Temperatur
T_C	Curie-Temperatur
t_0	minimale Schaltzeit
t_D	Wartezeit
t_P	Pulsdauer
t_S	Schaltzeit
V_0	Offsetspannung
V_{BL}	Spannung an Bitleitung
V_D	Drainspannung
V_{ERS}	Löschspannung
V_e	extern angelegte Schaltspannung
V_{FE}	Spannungsabfall über dem Ferroelektrikum
V_G	Gatespannung
V_{IF}	Spannungsabfall über der Grenzflächenschicht
V_{PGM}	Programmierspannung
V_R	Lesespannung

V_{SL}	Spannung an Sourceleitung
V_S	Sourcespannung
V_T	Schwellspannung
V_{WL}	Spannung an Wortleitung
V_W	Schreibspannung
w_{ij}	Gewicht von Korn A_{ij} mit Winkel φ_{ij} zur Vertikalen
W_j	Gewicht der Spalte j im Perkulationspfad
W_{P_i}	minimales Gewicht des Perkulationspfads in der i -ten Iteration
α	thermodynamischer Beitrag im NLS-Modell, bezogen auf Domänenwandenergie und Schaltanteile
ΔP	Polarisationsänderung
ϵ_0	elektrische Feldkonstante
ϵ_r	stoffabhängige Permittivitätszahl
ϵ_{FE}	Permittivitätszahl des Ferroelektrikums
ϵ_{IF}	Permittivitätszahl der Grenzflächenschicht
φ	senkrecht zur Ebene liegende Orientierung der ferroelektrischen Körner/Domänen
φ_{ij}	Winkel des Korns A_{ij} , bezogen auf die vertikale Richtung
φ_R	stabile Orientierung im Fall der Datenhaltung
ψ_S	Oberflächenpotential
σ	Streuung
τ	Schaltzeit
τ_0	kürzeste erforderliche Zeit für das Auftreten eines Keimprozesses

Abkürzungsverzeichnis

1F1R	Speicherzelle aus einem FeFET und einem Serienwiderstand
ACAM	Analog Content-Addressable Memory
ADC	Analog-Digital-Converter
ANN	Artificial Neuronal Network
BEoL	Back-End of Line
BER	Bit-Error Rate
BK	Bulk
BL	Bitleitung
BTO	Bariumtitanat, BaTiO ₃
CAM	Content-Addressable Memory
CIFAR	Canadian Institute for Advanced Research
CiM	Compute in Memory
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CNN	Convolutional Neuronal Network
DNN	Deep Neuronal Network
DRAM	dynamischer RAM
EEPROM	Electrically Erasable Programmable ROM
eNVM	emerging Nonvolatile Memories
FD-SOI	Fully Depleted Silicon on Insulator
FeFET	ferroelektrischer FET
FeFTF	Ferroelectric Thin-Film Transistor
FeMFET	FeFET mit zusätzlicher Metall-Schicht
FEoL	Front-End of Line

FET	Feldeffekttransistor
FRAM	ferroelektrischer RAM
FTJ	Ferroelectric Tunnel Junction
HfO ₂	Hafniumdioxid
HKMG	High- κ -Metal Gate
HSO	Si-dotiertes HfO ₂
HVT	High V_T
IFM	Inhomogeneous Field Mechanism
IMC	In-Memory Computing
KAI	Kolmogorov-Avrami-Ishibashi-Modell
KI	Künstliche Intelligenz
LVT	Low V_T
MAC	Multiply-Accumulate
MCAM	Multilevel Content-Addressable Memory
MFIS	Metal-Ferroelectric-Insulator-Semiconductor
MFM	Metall-Ferroelektrikum-Metall
MFMIS	Metal-Ferroelectric-Metal-Insulator-Semiconductor
ML	Match-Line
ML	Plate-Line
MLC	Multi-Level Cell
MNIST	Modified National Institute of Standards and Technology
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MRAM	magnetoresistiver RAM
MW	Memory Window
NLS	Nucleation-Limited Switching
NN	Neuronales Netz
PCRAM	Phase-Change RAM
PiM	Processing-in-Memory
PPMU	Pin Parametric Measurement Unit
PUF	Physical Unclonable Function
PVD	Physical Vapor Deposition
PXIe	PCI eXtensions for Instrumentation express
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
RAM	Random-Access Memory

ROM	Read-Only Memory
RRAM	resistiver RAM
RTA	Rapid Thermal Anneal
SiN	Siliziumnitrid
SiO ₂	Siliziumdioxid
SiON	Siliziumoxynitrid
SL	Sourceleitung
SL _c	Search-Line
SLC	Single-Level Cell
SMU	Source-Measure-Unit
SNN	Spiking Neuronal Network
SONOS	Silizium-Oxid-Nitrid-Oxid-Silizium
SRAM	statischer RAM
STT-MRAM	Spin-Transfer Torque Magnetic RAM
TCAD	Technology Computer-Aided Design
TCAM	Ternary Content-Addressable Memory
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
TiN	Titannitrid
TKD	Transmissions-Kikuchi-Diffraktion
VHDCI	Very High Density Connector Interface
WL	Wortleitung

1 Einleitung

Im Jahr 1965 formulierte Gordon Moore das, was später als Mooresches Gesetz bekannt wurde. Er konstatierte, dass sich die Anzahl der Transistoren pro Chip etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Dies galt nicht nur als Vorhersage, sondern wurde in der Halbleiterindustrie gewissermaßen zur sich selbst erfüllenden Prophezeiung. Obwohl physikalische Grenzen erwartet wurden, die das kontinuierliche Wachstum der Transistordichte begrenzen würden, konnten Fortschritte in der Prozess- und Fertigungstechnologie dieses Wachstum lange Zeit aufrechterhalten. Das Ende des Mooreschen Gesetzes wurde immer wieder prognostiziert, aber Innovationen haben bisher immer wieder die Limitierungen überwunden und das Ende weiter hinausgeschoben.

Zunehmende Einschränkungen führten zu einem Übergang von der klassischen geometrischen Skalierung zur sogenannten effektiven Skalierung. Dieser „More than Moore“-Ansatz beinhaltet, dass allein die Erhöhung der Transistordichte nicht mehr ausreicht, um den Bedürfnissen von modernen und komplexen Anwendungen gerecht zu werden, sondern rückt die Steigerung von Funktionalität und Effizienz der Mikrochips zunehmend in den Fokus, beispielsweise durch neuartige Integrationskonzepte, wie der heterogenen Integration oder des monolithischen 3D-Designs [1, 2]. Diese Entwicklungsschritte der Mikrochiptechnologie ermöglichen weitere Fortschritte, auch wenn die klassischen Skalierungsmethoden an ihre Grenzen stoßen.

Während die Skalierung der Rechenleistung also kontinuierlich voranschreitet, führten Wulf und McKee bereits 1995 den Begriff einer limitierenden Speicherbarriere (engl. Memory Wall) ein [3]. Denn obwohl Speicher- und Prozessorgeschwindigkeit im Laufe der Zeit exponentiell zunehmen, wächst die Rechenleistung noch schneller als die Leistung herkömmlicher Speicher. Diese Diskrepanz führt zu Verzögerungen in der Datenverarbeitung und kann die Systemleistung erheblich beeinträchtigen. Es entsteht ein Engpass, bei dem der Speicher nicht in der Lage ist, den Prozessor in der benötigten Geschwindigkeit mit Daten zu versorgen.

Die Fortschritte bei den gegenwärtig vorgestellten Künstliche-Intelligenz- (KI-) Systemen bringen auch Herausforderungen mit sich, da sie oft eine immense Rechenleistung und hohe Datenraten erfordern. Da KI-Anwendungen immer komplexere Berechnungen und Analysen durchführen, steigt der Bedarf an effizienten Speicher- und Rechenlösungen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, über die klassische Skalierung hinauszudenken und innovative Ansätze zu erforschen, die nicht nur die Anzahl der Transistoren, sondern auch die Gesamtfunktionalität und Effizienz der Mikrochips verbessern können.

Auch die verwendete Rechenarchitektur selbst hat einen entscheidenden Einfluss auf die Systemleistung. Die heute meist verwendete Von-Neumann-Rechenarchitektur hat Effizienz-einbußen durch einen geteilten Datenbus, den sogenannten Von-Neumann-Flaschenhals.

Tabelle 1.1: Vergleich gängiger Speichertechnologien.

Technologie	Mechanismus	Multilevel	Energiebedarf	Latenz	Zyklen	Nicht-flüchtig
SRAM	Ladung	nein	+++	+++	+++	nein
eDRAM	Ladung	nein	++	+	+++	refresh
Flash	Ladung	ja	--	---	---	ja
SONOS	Ladung	ja	-	+	--	ja
ReRAM	Filamentformation	ja	-	-	-	ja
PCM	Phasenänderung	ja	--	-	-	ja
STT-MRAM	Magnetisierung	nein	-	+	+	ja
FeFET/FRAM	Polarisation	ja	+++	++	+ / ++	ja

Dessen Einfluss kann zwar durch einen Cache abgemildert werden, dies wird aber mit zunehmender Datenrate immer schwieriger.

Grenzen der physikalischen Skalierbarkeit, steigende Datenmengen, limitierende Rechenarchitekturen und die wachsende Bedeutung von KI-Systemen münden in das gemeinsame Problem eines steigenden Energiebedarfs. All diese vielfältigen Herausforderungen sind eng miteinander verknüpft. Die Erforschung neuer Architekturen, die Überwindung der Speicherbarriere und innovative Integrationskonzepte könnten den Weg für die nächste Generation energieeffizienter und leistungsfähiger Systeme ebnen.

Die Ansätze hierfür sind vielfältig und beinhalten, neben der Erprobung neuer Rechenarchitekturen und Rechentechniken, die Erforschung verschiedener neuartiger nichtflüchtiger Speichertechnologien (eNVM, engl. emerging Nonvolatile Memories), die die Vorteile klassischer Speicher in einem Einheitsspeicher vereinen sollen. Zu den Vorteilen bei klassischen Speichern gehören, basierend auf Random-Access Memories (RAMs), die Geschwindigkeit von statischen RAMs (SRAM, engl. Static RAM) und die große Speicherdichte von dynamischen RAMs (DRAM, engl. Dynamic RAM) sowie die Nichtflüchtigkeit von Flash- und SONOS (Silizium-Oxid-Nitrid-Oxid-Silizium)-Speichern.

Zu diesen neuen physikalischen Konzepten gehören unter anderem resistive RAMs (RRAMs), auf Phasenänderung basierende Speicher (PCRAM, engl. Phase-Change RAM) und magnetische Speicherkonzepte, die magnetoresistive Speicher (MRAM, engl. Magnetoresistive RAM), oder die Spin-Magnetisierung (STT-MRAM, engl. Spin-Transfer Torque Magnetic RAM) nutzen. Die Schreib- und Leseprozesse werden in all diesen Konzepten durch einen elektrischen Strom gesteuert.

Eine Alternative stellen Speicherelemente dar, die auf ferroelektrischen Materialien basieren. Bei diesen wird die Information mittels eines elektrischen Feldes gespeichert. Anwendung findet dies in vier Speicherkonzepten: angelehnt an klassischen DRAM in ferroelektrischen RAMs (FRAM, engl. Ferroelectric RAM), in ferroelektrischen Feldeffekttransistoren (FeFET, engl. Ferroelectric Fieldeffect Transistor), in ferroelektrischen Feldeffekttransistoren mit zusätzlicher Metall-Schicht (FeMFET, engl. Ferroelectric Metal Fieldeffect Transistor) oder in ferroelektrischen Tunnelzellen (FTJ, engl. Ferroelectric Tunnel Junction).

Tabelle 1.1 vergleicht die Vor- und Nachteile klassischer Speichertechnologien und einiger neuer nichtflüchtiger Speicher. Keine der aktuell erforschten Technologien weist gegenüber den anderen einen absoluten Vorteil auf, aber insbesondere FeFETs vereinen viele dieser Vorteile. Allerdings haben sie bisher noch eine etwas geringe Zyklenfestigkeit.

Neue Speicherkonzepte ermöglichen neue Rechenarchitekturen und Rechentechniken.

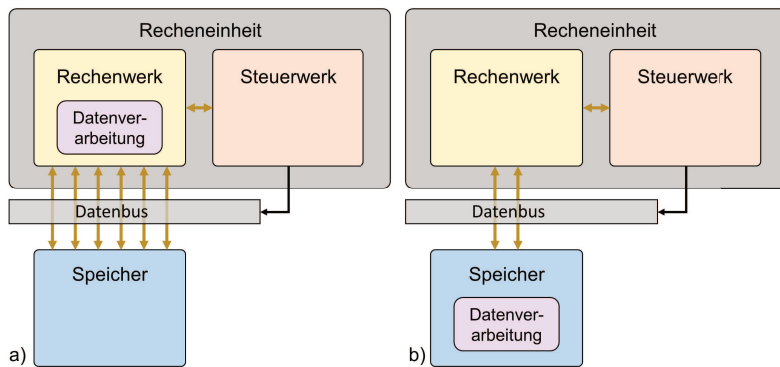


Abbildung 1.1: Vergleich von a) konventionellen Rechenarchitekturen mit getrennter Speicherung und Verarbeitung der Daten und b) dem Konzept des „Rechens im Speicher“, bei dem die Verarbeitung der Rohdaten direkt im Speicher erfolgt, was zu einer Reduzierung des notwendigen Datentransports führt.

Das Abrücken von einer allgemeinen Rechenarchitektur, bei der Datenspeicherung und Datenverarbeitung strikt voneinander getrennt sind, führt hin zu stärker integrierten, spezialisierten und damit effizienteren Architekturen (siehe Abbildung 1.1).

Eines dieser Felder ist die vom Gehirn inspirierte Datenverarbeitung (engl. Brain-inspired Computing). Bei der neuromorphen Datenverarbeitung dienen neurobiologische Strukturen des Nervensystems als Vorbild. Verwendung findet diese in neuronalen Netzen (NN, engl. Neural Network). Neben softwarebasierten Lösungen lassen sich Berechnungen direkt in der Hardware, also im Speicher selbst durchführen. Bei diesem Ansatz des speicherbasierten Rechnens (IMC, engl. In-Memory-Computing; auch CiM, engl. Compute-in-Memory) werden für verschiedene Konzepte unterschiedliche Anforderungen an die Speicherelemente gestellt. Beispielsweise werden Speicherelemente, die möglichst viele Zustände speichern können, idealerweise mit einem analogen Speicherübergang für neuronale Faltungsnetzwerke (CNN, engl. Convolutional NN) oder tiefe NN (DNN, engl. Deep NN) benötigt. Neuronale Spike-Netzwerke (SNN, engl. Spiking NN) hingegen setzen abrupt schaltende Speicherelemente voraus.

Unterschiedliche Rechensysteme stellen also unterschiedliche Anforderungen an die verwendeten Speicherelemente. FeFETs haben das Potenzial, durch eine an die Anwendung angepasste Material- und Bauelemententwicklung sowie durch geeignete Ansteuermethoden den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. Inwiefern sie sich als universelle Speicherelemente eignen, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Das erste Mal wurde Ferroelektrizität 1921 in Rochelle-Salz nachgewiesen [4]. Die Namensgebung „Ferroelektrizität“ folgte aus der Ähnlichkeit der feldgesteuerten Polarisationshysterese mit dem Hystereseverhalten ferromagnetischer Materialien. Nutzbar wurde die Ferroelektrizität mit der Entdeckung von entsprechenden Materialien mit Perowskit-Struktur. Das betraf zunächst Bariumtitanat, BaTiO_3 (BTO), was 1946 von Hippel (USA), sowie Wul und Goldman (Russland), aufgefunden wurde [5, 6]. Später dann fand man mit Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) [7] ein Material, welches gegenüber BTO eine höhere Curie-Temperatur, größere Dielektrizitätskonstante und kleinere Polarisationshysterese hat.

Das erste Konzept eines ferroelektrischen Speichers wurde 1952 vorgestellt [8]. Die ersten gefertigten Speicherfeld-Strukturen wurden Ende der 1980er Jahre demonstriert [9]. In den 1990er Jahren erfolgte die Kommerzialisierung durch die Firma Ramtron [10],

deren Produkte nach Übernahme durch Cypress inzwischen durch Infineon weiterentwickelt werden. Anfang der 2000er Jahre erreichten die Speicherfelder Größen im Mb-Bereich [11, 12, 13, 14, 15] und konnten bis hin zu 130 nm-CMOS-Prozessen (engl. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) skaliert werden [16].

Perowskit-basierte Speicher weisen jedoch eine begrenzte Skalierbarkeit und Zyklenfestigkeit auf und sind mit Standard-CMOS-Prozessen in der Mikroelektronikindustrie inkompatibel. Dies führte dazu, dass ihre Entwicklung am 130 nm-Knoten zum Stillstand kam [12, 17]. Anwendung finden Perowskit-basierte ferroelektrische Materialien heute neben der Verwendung in elektrisch löschbaren programmierbaren ROM (EEPROM, engl. Electrically Erasable Programmable ROM) vor allem in Sensor- und Aktoranwendungen in der Mikro- und Nanoelektronik.

Alle bis dahin realisierten ferroelektrischen Speicher basieren auf dem FRAM-Konzept. Das Konzept eines FeFETs wurde zwar bereits 1955 zum Patent angemeldet [18, 19, 20, 21], die Realisierung mit Perowskit-basierten Materialien erwies sich aber als schwierig. Eine vergleichsweise hohe Dielektrizitätskonstante der Perowskite sorgt für hohe Depolarisationsfelder im Stapelaufbau, welche eine limitierte Datenhaltung zur Folge hat. Zudem fordern hohe Koerzitivfeldstärken hohe Schaltspannungen [22].

Allerdings hat die Entdeckung der Ferroelektrizität in Hafniumdioxid (HfO_2) im Jahr 2008 [23] und die Veröffentlichung dieser Entdeckung im Jahr 2011 [24] durch Böске et al. der Entwicklung von FeFETs neuen Auftrieb gegeben. HfO_2 weist eine Reihe von Vorteilen auf. Es ist CMOS-kompatibel, direkt auf Siliziumwafern integrierbar, bleifrei, kann in niedrigen Abscheidungsdicken realisiert werden und besitzt eine vergleichsweise niedrige Dielektrizitätskonstante sowie geringe Leckströme [1, 25]. Außerdem ist es für den Einsatz in 3D-Nanostrukturen geeignet [26].

Inzwischen wurden ferroelektrische Speicher auf FeFET-Basis im Mb-Bereich auf 28 nm und 22 nm Technologieknoten demonstriert [27, 28]. Auch das FeMFET-Konzept wurde inzwischen in Speicherfeldern im 180 nm Technologieknoten umgesetzt [29, 30].

Dennoch sind bei HfO_2 noch verschiedene Phänomene, wie der Aufwach-Effekt (engl. Wake-up Effect) und Einflüsse auf das Schaltverhalten nicht vollständig verstanden und Probleme wie die Zell-Variabilität und die Zyklenfestigkeit in FeFETs zu verbessern.

Diese Arbeit widmet sich deshalb einigen der Herausforderungen bei der Anwendung HfO_2 -basierter FeFETs (Abbildung 1.2). Zunächst werden die elektrischen Eigenschaften, wie Schaltverhalten, Datenhaltung und Zyklenfestigkeit der FeFETs behandelt, anschließend die physikalischen Grundlagen, die Strompfadperkolation. Die Arbeit widmet sich dann insbesondere der Multilevel-Ansteuerung, also die Adressierung mehrerer Speicherzustände der FeFETs, die Nutzung dieser Ansteuerung im Speicherfeld sowie die Anwendung im Bereich des In-Memory Computing (IMC). Dazu gibt Kapitel 2 zunächst einen Überblick über ferroelektrische Materialien und die typischen ferroelektrischen Speicherkonzepte.

Anschließend wird in Kapitel 3 das im Fokus stehende Konzept des FeFET genauer betrachtet. Dabei stehen der Stapelaufbau, d.h. die Anordnung der Materialien, sowie deren elektrische Eigenschaften, die Herstellung und die daraus resultierenden Aspekte der Entwicklung massenmarktauglicher Speicherelemente im Vordergrund. Die Gegenüberstellung verfügbarer Modelle zur Beschreibung von FeFETs und deren ferroelektrischem Schaltverhalten führt von einer idealisierten Betrachtung der FeFETs zu den spezifischen Besonderheiten beim Schreiben der Speicherinformation in FeFETs. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss von Perkolationsstrompfaden, welche sich in Abhängigkeit von Schaltvorgängen in der HfO_2 -Schicht im Transistorkanal ausbilden, diskutiert, da sie die physikalische Ursache bilden.

Kapitel 4 beschreibt die elektrische Charakterisierung wesentlicher Parameter von FeFETs wie Schaltverhalten, Zyklenfestigkeit und Datenhaltung auf Siliziumwafern. Dazu wird

zunächst ein geeigneter Messaufbau entwickelt. Die Charakterisierung erfolgt dann an Einzel-FeFETs und FeFETs im Speicherfeld. Aus den Ergebnissen an einzelnen FeFETs werden Variabilitätseinflüsse klassifiziert sowie die Abhängigkeit des Schaltverhaltens von der Breiten- und Längenskalierung von FeFETs ermittelt.

Durch die Kombination der elektrischen Daten mit Ergebnissen aus den Materialanalysen der HfO_2 -Mikrostruktur wird in Kapitel 5 ein empirisches Modell erstellt, mit dem der zugrundeliegende Effekt von Perkulationsstrompfaden, welche sich in Abhängigkeit von der Polarisationsumkehr in der HfO_2 -Schicht ausbilden, aufgezeigt und der Breiten- und Längeneinfluss auf das Schaltverhalten erklärt wird. Mithilfe des Simulationsmodells wird erkundet, wie sich anwendungsspezifische Schalteigenschaften von FeFETs für klassische nichtflüchtige Speicher oder als neuromorphe Speichereinheiten optimieren lassen.

Die gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere aus der Charakterisierung des Schaltverhaltens, fließen in Kapitel 6 in die Ansteuerung der Speicherfelder ein. Sie ermöglichen die Definition von Ansteuer-Schemata zur Verwendung der FeFETs als Multi-Level Cell (MLC).

Diese Multilevel-Ansteuerung im Speicherfeld wird anschließend genutzt, um in Kapitel 7 neue Konzepte zum neuromorphen Rechnen in den Speicherfeldern zu evaluieren.

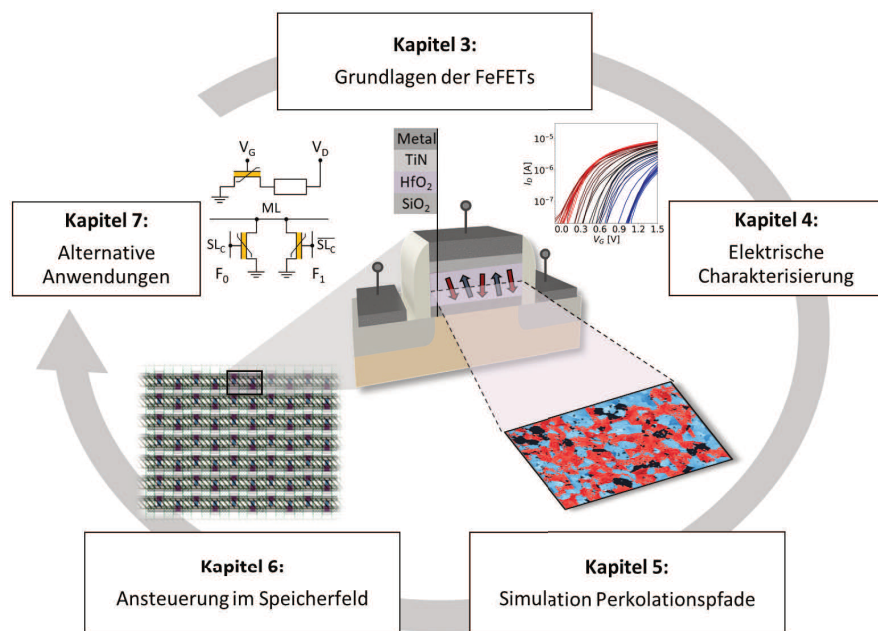


Abbildung 1.2: Aufbau und Inhalte der vorliegenden Arbeit.

2 Ferroelektrische Speicher: Stand der Technik

Um die Funktionsweise ferroelektrischer Speicher zu verstehen, wird in diesem Kapitel die Funktionsweise der Polarisationsumkehr anhand der bisherigen Erforschung der Ferroelektrika erläutert. Es wird untersucht, wie diese Materialeigenschaft als Speicherinformation genutzt werden kann. Anschließend werden die gängigen ferroelektrischen Speichertypen vorgestellt und in ihrer Funktionsweise beschrieben. Ausgehend von diesem Stand der Technik wird die Relevanz der Betrachtung der FeFETs in dieser Arbeit erläutert und die Zielsetzungen der Arbeit zusammengefasst.

2.1 Materialien für ferroelektrische Speicher

Ferroelektrische Materialien verfügen unterhalb der Curie-Temperatur T_C über zwei stabile Polarisationszustände. Durch eine nicht-zentrosymmetrische Kristallstruktur bildet sich ein Dipol aus. Gut ersichtlich ist dies am Beispiel von Ferroelektrika mit Perowskit-Struktur wie PZT (Abbildung 2.1). In PZT wird durch eine Verschiebung des zentralen Ti-Ions weg vom Zentrum der Einheitszelle eine spontane, gerichtete Polarisation hervorgerufen.

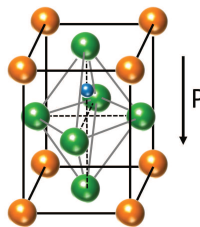


Abbildung 2.1: PZT-Einheitszelle. Orange: Bleiionen, grün: Sauerstoffionen, blau: polarisationsrichtungsbestimmendes Titanat- oder Zirkonion.

Gesteuert wird diese Polarisation durch ein elektrisches Feld E_f . Dieses wirkt auf den Dipol, indem das zentrale Ion dem induzierten elektrischen Feld entgegenwirkt. Wird das Ion in Richtung der Mittelposition verschoben und die Koerzitivfeldstärke E_C erreicht, springt das Ion entlang der Polarisationsachse auf die entgegengesetzte Seite (Abbildung 2.2a). In der Folge kommt es zu einer Polarisationsumkehr. Dies entspricht nach der Landau-Theorie einem Phasenübergang zweiter Ordnung [31, 32].

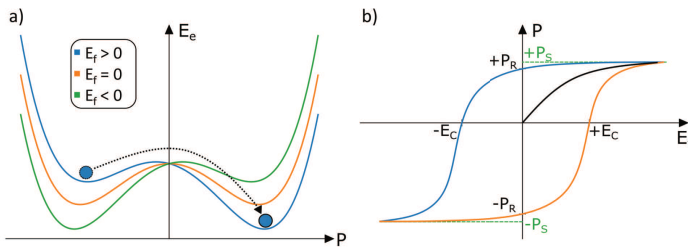


Abbildung 2.2: a) Potentialverschiebung in ferroelektrischen Materialien nach dem Landau-Modell zweiter Ordnung durch Wirkung eines externen elektrischen Feldes E_f . b) Polarisations-Feld-Hysteresekurve. E_C : Koerzitivfeldstärke, P_S : Sättigungspolarisation, P_R : remanente Polarisation

Wenn ein ferroelektrisches Material insgesamt einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt ist, wird es polarisiert und seine Dipole richten sich in Richtung des elektrischen Feldes aus. Wenn das elektrische Feld zunimmt, nimmt auch die Polarisierung zu, bis sie die Sättigungspolarisation P_S erreicht, bei der alle Dipole ausgerichtet sind (Abbildung 2.2b). Wird das Feld entfernt, relaxieren einige Dipole, was zu einem Zurückfallen auf eine remanente Polarisation P_R führt. Durch ein wechselndes elektrisches Feld wird die in Abbildung 2.2b dargestellte Polarisationshysteres erzeugt.

Ähnlich verhält sich die Einheitszelle von HfO_2 mit seiner Fluorit-Struktur (Abbildung 2.3). Durch geeignete thermomechanische Prozessierung wird das Material in eine ferroelektrische Phase gebracht [24]. Während der Kristallisation durchläuft HfO_2 verschiedene Phasen einschließlich der orthorhombischen Phase, die für ihre ferroelektrischen Eigenschaften bekannt ist. Diese Phase ist jedoch instabil. Bei der Fertigung ist es daher für ferroelektrische Anwendungen nötig, das HfO_2 in die metastabilen orthorhombischen Phase zu versetzen, ohne dass es in die energetisch stabilere, aber nicht-ferroelektrische monokline Phase überführt wird [24, 33].

Zur Stabilisierung der ferroelektrischen Phase von HfO_2 werden Dotierstoffe eingesetzt, die gezielt in das Kristallgitter eingebaut werden, um die Bildung der orthorhombischen Phase zu fördern und deren Stabilität zu erhöhen. Diese Dotierstoffe beeinflussen die energetischen Verhältnisse der verschiedenen Kristallphasen und verschieben die Umwandlungstemperaturen zwischen den Phasen. Typische Dotierstoffe sind Silizium (Si), Zirkonium (Zr), Yttrium (Y), Lanthan (La) und Aluminium (Al) [34].

In HfO_2 sind acht Sauerstoffatome vorhanden. In der orthorhombischen Phase besitzen vier davon zwei lokale Energieminima. Die Sauerstoffatome werden zwischen diesen beiden spiegelsymmetrischen Positionen entlang der Polarisationsachse verschoben und ermöglichen so eine spontane Polarisation. Die beiden Polarisationsrichtungen sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

Eine HfO_2 -Einheitszelle besitzt eine Größe von ca. 5 Å. Eine Besonderheit von HfO_2 ist, dass nur eine Hälfte der Einheitszelle die Polarisierungseigenschaft aufweist, während die andere Hälfte der Zelle ein dielektrisches und nicht-ferroelektrisches Verhalten zeigt. Letztere isoliert die ferroelektrischen Bereiche faktisch voneinander [35, 36].

Das ferroelektrische Material ist bei integrierten Schaltungen als eine Dünnschicht aufgetragen. Diese besteht aus einer Vielzahl von Einheitszellen mit einer identischen Orientierung entlang der Polarisationsachse. Kommt es zu einer Polarisationsumkehr, beginnen einzelne Bereiche zu schalten und es bilden sich sogenannte Domänen, welche durch eine Domänenwand voneinander getrennt sind. Mit Beginn der Polarisationsumkehr wachsen die Domänen durch die Bewegung der Domänenwände sowohl in die Tiefe als auch in die

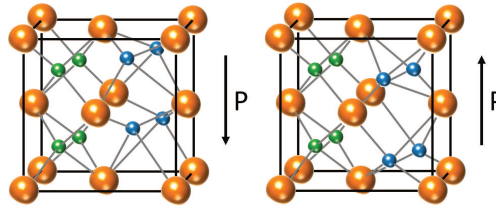


Abbildung 2.3: HfO_2 in ferroelektrischer orthorhombischer Phase mit beiden möglichen Polarisationszuständen. Orange: Hafniumionen, grün: ortsfeste Sauerstoffatome, blau: ortsveränderliche polarisationsdefinierende Sauerstoffatome

Breite. Dieser Ausbreitungsprozess wird bei polykristallinem HfO_2 durch Korngrenzen unterbrochen, die einzelne Bereiche voneinander trennen. Sie sind zum einen Ausgangspunkt für Defektstellen und Leckstrompfade [37], zum anderen unterbrechen sie die von monokristallinen Strukturen bekannten Schaltprozesse und entkoppeln sie faktisch voneinander, wie in Abbildung 2.4 gezeigt. Die voneinander getrennten Bereiche verhalten sich jedoch in der Einzelbetrachtung so, wie es von monokristallinen Strukturen bekannt ist. Die einzelnen Körner weisen verschiedene Orientierungen der Polarisationsachse auf. Das führt zu einer Verteilung von lokalen Orientierungen und einer entsprechenden Variation der lokalen Polarisation, wie durch piezokraftmikroskopische Messungen nachgewiesen wurde [38].

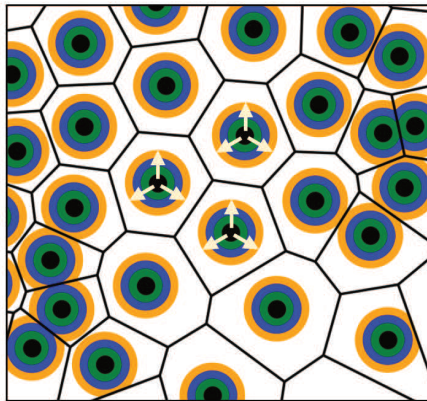


Abbildung 2.4: Ausbreitung der Polarisationsumkehr in einer durch Korngrenzen unterbrochenen polykristallinen Schicht (Draufsicht).

Eine Besonderheit von HfO_2 ist, dass diese Domänenwände sehr dünn sind, für 180° -Domänenwände z.B. eine halbe Einheitszelle [35, 39]. Bei 90° -Domänenwänden wurde deren Domänenwanddicke in der Größenordnung einer Einheitszelle bestimmt [34]. Somit unterscheiden sich die Domänenwände in HfO_2 zu Perowskit-basierten Ferroelektrika [17, 35].

Tabelle 2.1 stellt ausgewählte Materialeigenschaften von PZT und HfO_2 gegenüber. Verglichen mit Perowskit-basierten Ferroelektrika weist HfO_2 entscheidende Unterschiede in seiner Materialstruktur und auch hinsichtlich seiner Materialeigenschaften auf. Dazu zählt, bei vergleichbarer remanenter Polarisation P_R , eine hohe Koerzitivfeldstärke E_C , welche in Speicheranwendungen zu einer guten Separierung der Speicherzustände führt und damit

eine stärkere Schichtdickenskalierung ermöglicht [40]. Allerdings bringt dies auch Nachteile in der Zuverlässigkeit mit sich, wie in Abschnitt 3.3 erläutert wird. Zusammen mit der hohen Koerzitivfeldstärke E_C resultiert die niedrige stoffabhängige Permittivitätszahl ϵ_r von HfO_2 in einer guten Datenhaltung, was durch das geringe entgegenwirkende Depolarisationsfeld E_{dep} hervorgerufen wird [41, 42].

Während Perowskit-Materialien in CMOS-Prozessen nur begrenzt einsetzbar sind [43, 44], gehören HfO_2 als Dielektrikum dort bereits zum Standard. Durch einen breiten Bereich möglicher Kristallisationstemperaturen kann HfO_2 als ferroelektrisches Material in den Fertigungsschritten sowohl von Front-End of Line (FEoL) als auch Back-End of Line (BEoL) verwendet werden [45]. FEoL bezeichnet dabei den Teil des Herstellungsprozesses, in dem die aktiven Komponenten eines Halbleiterbauelements, wie Transistoren, aufgebaut werden. BEoL hingegen beschreibt die anschließenden Prozessschritte, in denen die Verdrahtung zwischen den Transistoren und anderen aktiven Bauelementen auf dem Chip hergestellt wird. Zusätzlich zur Verdrahtung sind im BEoL-Prozess auch passive Bauelemente wie Widerstände und Kondensatoren realisierbar. Die Kompatibilität zu beiden Prozessschritten begünstigt die Einsetzbarkeit von HfO_2 in verschiedenen Speicherkonzepten, wie im nachfolgenden Abschnitt 2.2 erläutert wird.

Tabelle 2.1: Vergleich der Materialeigenschaften von PZT und HfO_2 . Werte nach [45, 46]

Parameter	PZT	HfO_2
Remanente Polarisation P_R [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	20-40	1-40
Koerzitivfeldstärke E_C [MV/cm]	≈ 0.05	1-2
Stoffabhängige Permittivitätszahl ϵ_r	≈ 400	≈ 30
Min. Schichtdicke [nm]	50	1
Kristallisationstemperatur	$> 600^\circ\text{C}$	300-1050 $^\circ\text{C}$

2.2 Etablierte ferroelektrische Speicherkonzepte

Bisher haben sich drei Konzepte, die auf ferroelektrischen Materialien basieren, etabliert (Abbildung 2.5):

1) FRAM (Abbildung 2.5-1)

- Er besteht aus einem MOSFET und einer ferroelektrischen Kapazität, die an den Drain-Anschluss des Transistors angeschlossen ist.
- In CMOS-Prozessen wird eine solche Speicherzelle durch Verbinden einer ferroelektrischen Kapazität im BEoL mit einem MOSFET im FEoL hergestellt.

2a) FeMFET (Abbildung 2.5-2a)

- Hier wird im Unterschied zum FRAM die Kapazität an das Gate des Transistors angeschlossen.
- Auch hier wird in CMOS-Prozessen eine ferroelektrische Kapazität aus dem BEoL-Bereich mit einem FEoL-MOSFET gekoppelt, um die Speicherzelle zu realisieren.
- Der Stapelaufbau ist in diesem Fall eine Metal-Ferroelectric-Metal-Insulator-Semiconductor- (MFMS-) Struktur.