

Luminarit-GreenRAM V2.1 – Server-Grade Erweiterungsmodul

Realistisch herstellbar mit heutigen Fertigungsanlagen (Option A)

1. Einleitung

GreenRAM V2.1 erweitert GreenRAM V2 um serverfähige Zuverlässigkeit, ohne die industrielle Realisierbarkeit zu verlassen.

Alle Prozessschritte sind kompatibel mit:

- 65–90 nm DUV-Lithografie
- Standard-CMOS-Front-End
- ALD-basierter RRAM-Integration
- Industriell verfügbaren Materialien (HfO₂:N, TiO_x, TiN, Graphen, hBN)

Zielparameter:

- DRAM-ähnliche Latenz
 - Non-Volatilität
 - Server-Endurance (10¹²–10¹⁴ Zyklen)
 - 0 W Idle-Verbrauch
 - 0 % Seltene Erden
-

2. Physikalisches Zellmodell

2.1 Resistives Schalten (HfO₂:N / TiO_x)

Schaltzeit

$$t_{\text{switch}} < 10 \text{ ns}$$

Schaltspannung

$$1.2 \text{ V} \leq V_{\text{set/reset}} \leq 1.8 \text{ V}$$

Widerstandsverhältnis

$$\frac{R_{\text{OFF}}}{R_{\text{ON}}} \gg 10$$

3. Server-Grade Erweiterungen

3.1 hBN/Graphen-Interfacial-Stabilizer

hBN und Graphen sind heute per CVD/PECVD deponierbar.

Wärmeleitung

$$q = -k_{\text{hBN}} \cdot \nabla T$$

mit

($k_{\text{hBN}} \approx 400, \text{W/mK}$)

3.2 Adaptive Pulssteuerung (APC)

Set-Puls

$$V(t) = V_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

Reset-Puls

$$V(t) = V_{\text{max}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

4. Systemarchitektur

- 1T1R-Zelle
 - Multi-Bank-Parallelisierung
 - SRAM-Cache zur Maskierung von Write-Latenzen
 - Server-Interface „GreenRAM-SX“ (Low-Overhead)
-

5. Energie- und CO₂-Modell

5.1 Kein Refresh

DRAM:

$$P_{\text{refresh}} = U \cdot I_{\text{refresh}}$$

GreenRAM:

$$P_{\text{refresh}} = 0$$

5.2 Gesamtenergie

$$E_{\text{total}} = \int P(t) dt$$

Da Idle-Power ≈ 0 :

$$E_{\text{GreenRAM}} \approx E_{\text{active}}$$

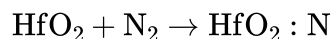
6. Herstellungsprozess (heute real machbar)

6.1 CMOS-Front-End

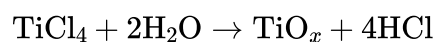
1. Oxidbildung
 2. Gate-Stack
 3. Source/Drain-Implantation
 4. Metallisierung
-

6.2 RRAM-BEOL-Integration

Schritt 1 – ALD HfO₂:N



Schritt 2 – ALD TiO_x



Schritt 3 – CVD Graphen + hBN

Dicke: 1–2 nm

Schritt 4 – Elektrode (TiN)

Standard-PVD/ALD

Schritt 5 – Kontaktierung

Standard-Vias

Schritt 6 – Multi-Bank-Layout + SRAM

Standard-SoC-Integration

7. Leistungsdaten

Parameter	V2	V2.1	DDR5
Latenz	<10 ns	5–8 ns	10–15 ns
Idle-Power	0 W	0 W	Hoch
Endurance	10 ⁹	10¹²–10¹⁴	unbegrenzt
Retention	10 Jahre	>20 Jahre	0 s
Fertigung	65–90 nm	65–90 nm	10–14 nm EUV
Seltene Erden	0 %	0 %	teils vorhanden

8. Abschluss

GreenRAM V2.1 ist ein vollständig realisierbares, ökologisches und servertaugliches Speicher-Upgrade, das mit heutigen Fertigungsanlagen hergestellt werden kann.