

Space Radiation Effects in Electronics

Florian Marius Adamczyk^{a,1}

^aJustus-Liebig-Universität Gießen

Modul Wissenschaftliches Präsentieren

Zusammenfassung—Dieses Handout fasst die wichtigsten Inhalte der Präsentation „Space Radiation Effects in Electronics“ zusammen. Im Fokus stehen die Grundlagen kumulativer Strahlungsschäden (TID), die Strahlungs-umgebung im Orbit, der physikalische Mechanismus im MOS-Bauelement, funktionale Konsequenzen in Schaltungen sowie Test- und Qualifikationsverfahren (RHA).

Keywords—Total Ionizing Dose, MOS, Raumfahrt, RHA, TID-Tests

1. Einordnung der Strahlungseffekte

Strahlungseffekte in Elektronik lassen sich grob in zwei Klassen einteilen: (i) kumulative Effekte wie **Total Ionizing Dose (TID)** und **Displacement Damage (DDD)**, die dosisabhängig und langsam wirken; und (ii) **Single Event Effects (SEE)** wie SEU/SEL/SE-B/SEGR, die durch Einzelereignisse verursacht werden und spontan auftreten. TID steht im Zentrum dieses Handouts, da sie nahezu alle Technologien betrifft und langfristig zu Parameterverschiebungen und Degradation führt.

2. Strahlungsumgebung

2.1. Quellen im Weltraum

Relevante Quellen sind die **Sonne** (solare Protonenereignisse), die **Van-Allen-Gürtel** (gefangene Protonen und Elektronen) sowie **GCR** (galaktische kosmische Strahlung). Für TID tragen vor allem **Elektronen und Protonen** bei; Photonen und sekundäre Elektronen ergänzen den Beitrag [6].

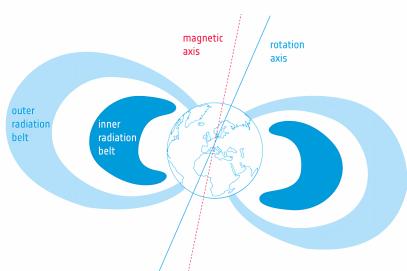


Abbildung 1. Illustration kosmischer Strahlungsquellen [6].

2.2. Südatlantische Anomalie (SAA)

Die SAA ist ein Gebiet mit lokal geschwächtem Erdmagnetfeld, in dem erhöhte Flüsse von MeV-Protonen und -Elektronen auftreten. Satelliten in LEO durchqueren die Region regelmäßig; die **Dosis akkumuliert** über die Missionsdauer und kann je nach Orbit und Abschirmung **zweistellige krad(Si)** erreichen [7].

3. TID-Mechanismus im MOS

3.1. Ionisation im Oxid

Ionisierende Strahlung erzeugt **Elektron-Loch-Paare** im SiO_2 -Gateoxid. Aufgrund der **geringen Lochmobilität** werden Löcher in **Defektstellen (Traps)** eingefangen (z.B. Oxygen Vacancies, E'-Center), während Elektronen schnell entweichen. Es entsteht eine **persistente positive Raumladung** im Oxid [1].

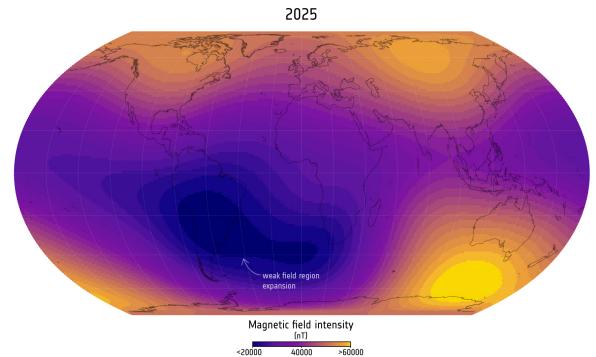


Abbildung 2. Südatlantische Anomalie [7].

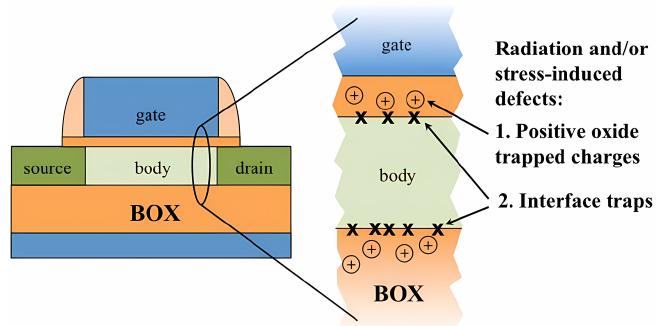


Abbildung 3. Schema: Erzeugung und Trapping von Ladungsträgern im Gateoxid [1].

3.2. Auswirkungen auf Transistor

Die Oxidladung verschiebt die **Schwellenspannung (V_{th})**: bei NMOS sinkt V_{th} , der Kanal leitet früher; Leckströme steigen, der Subthreshold-Bereich wird flacher. Bei PMOS sind die Vorzeichen oft umgekehrt [2].

4. Funktionale Konsequenzen

Auf Schaltungsebene führt TID zu **Timing-Änderungen** und langsameren Schaltzeiten, zu **erhöhten Ruheströmen** und **Mismatch** in Analogschaltungen (Offsets, Verstärkungsänderungen). Langfristig **driften Bauteile aus der Spezifikation** und können ausfallen. In digitalen Schaltungen verschieben sich Logikpegel und **Noise-Margen** werden schlechter.

5. Tests und Qualifikation (RHA)

5.1. Ziele der RHA

Für Raumfahrt-Elektronik muss nachgewiesen werden, dass Bauteile unter der **Missionsdosis** funktionsfähig bleiben. Zielgrößen sind u.a. ΔV_{th} , Leckströme und Funktionsgrenzen (Logikpegel, analoge Spezifikationen) [3].

5.2. TID-Testquellen und Randbedingungen

Typische Quellen sind **Co-60-Gammastrahler** (1,17/1,33 MeV) und **Elektronen** ($E \geq 1$ MeV). Gründe: hohe **Penetration** und **homogene Dosis** bei geringer DDD-Komponente. Nach Normen (z.B.

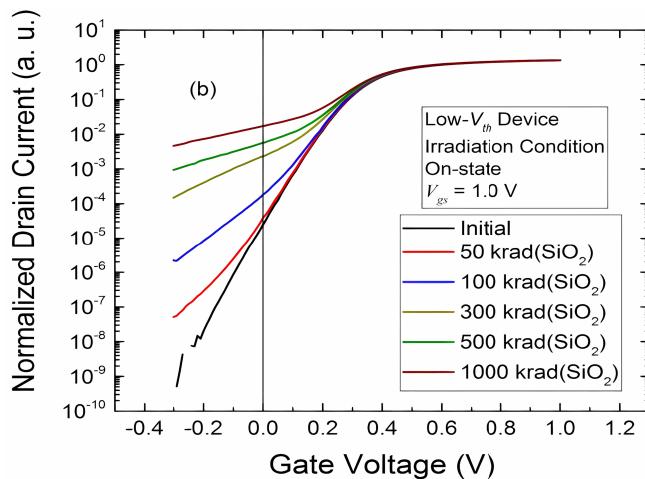


Abbildung 4. Auswirkungen auf I-V-Kennlinien und Parameter [2].

ESCC 22900) werden geeignete **Dosisraten** gewählt und **Charged-Particle Equilibrium** sichergestellt; Low-Energy-Anteile werden durch **Pb/Al-Abschirmung** reduziert.

6. Kernaussagen

- TID ist ein kumulativer Ionisationsschaden in **Oxiden/Grenzflächen**.
- Hauptmechanismus: **Oxid-trapped charge** $\Rightarrow \Delta V_{th}$, Mobility Degradation, Leckstrom \uparrow .
- Bauteile **driften aus Spezifikation** bis zum Funktionsverlust.
- RHA/TID-Tests sind unverzichtbar für Weltraummissionen.

7. Telstar 1: Aufstieg und abruptes Ende

Der Kommunikationssatellit **Telstar 1** startete am 10. Juli 1962 und ermöglichte die ersten transatlantischen Live-Fernsehübertragungen. Kurz darauf traten jedoch Anomalien auf: Befehle wurden sporadisch ignoriert, bis der Satellit am 21. Februar 1963 endgültig ausfiel. Als wesentlicher Beitrag zur Degradation gilt die **kumulative Ionisationsdosis (TID)**, die durch die am Vortag des Starts durchgeführte Hochatmosphärenkerンexplosion **Starfish Prime** stark erhöht wurde [4, 5].



Abbildung 5. Telstar 1 – Symbol der ersten transatlantischen TV-Live-Übertragung [5, 8].

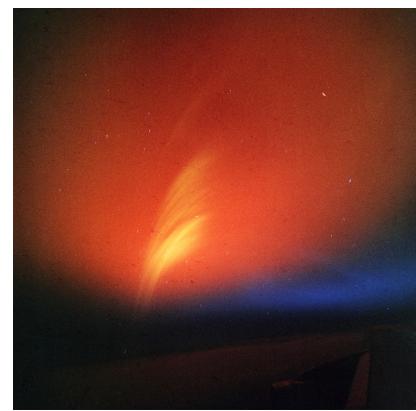


Abbildung 6. Starfish Prime (1962): Hochatmosphärischer Nukleartest und verstärkte Strahlungsgürtel [4].

Literatur

- [1] I. Sanchez Esqueda, H. Barnaby und M. King, „Compact Modeling of Total Ionizing Dose and Aging Effects in MOS Technologies“, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Jg. 62, Juni 2015. DOI: [10.1109/TNS.2015.2414426](https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2414426).
- [2] M. P. King u. a., „Analysis of TID Process, Geometry, and Bias Condition Dependence in 14-nm FinFETs and Implications for RF and SRAM Performance“, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Jg. 64, Nr. 1, S. 285–292, 2017. DOI: [10.1109/TNS.2016.2634538](https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2634538).
- [3] calebnstxl, *Strengthening Electronic Reliability through Radiation Hardening - NSTXL*, NSTXL, Accessed 2025-11-28, März 2022. Adresse: <https://nstxl.org/reliability-through-radiation-hardening/>.
- [4] Atomic Archive, *Operation Fishbowl | Starfish Prime (1962)*, AtomicArchive.com, Yield: 1.4 Megatons; Location: Johnston Island area — high altitude (tens of miles); Event date: July 9, 1962. Accessed 2025-11-27, 2024. Adresse: <https://www.atomicarchive.com/media/photographs/testing/us/fishbowl/fishbowl-8.html>.
- [5] BBC, *First Live Television Transmission from the US via Telstar Satellite*, BBC.com, Accessed 2025-11-28, 2024. Adresse: <https://www.bbc.com/historyofthebbc/anniversaries/july/telstar-satellite>.
- [6] European Space Agency (ESA), *Radiation Rangers: What Two Mannequins Learned on Artemis I - Orion Blog*, blogs.esa.int/orion, Accessed 2025-11-28, Dez. 2024. Adresse: <https://blogs.esa.int/orion/2024/12/04/radiation-rangers-what-two-mannequins-learned-on-artemis-i/>.
- [7] European Space Agency (ESA), *South Atlantic Anomaly 2025 Compared to 2014*, ESA.int / ESA Multimedia - Images, Credit: ESA (Data source: Finlay, C.C. et al., 2025). Licence: ESA Standard Licence. Accessed 2025-11-28, Okt. 2025. Adresse: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/10/South_Atlantic_Anomaly_2025_compared_to_2014.
- [8] SN/GFDUNT (Adobe Stock), *Telstar 1 - the World's First Transatlantic Broadcast Satellite, Launched in 1962*, Adobe Stock (Stock-Illustration), File no.: 174965630. Accessed 2025-11-27, 2025. Adresse: https://stock.adobe.com/de/images/telstar-1-the-world-s-first-transatlantic-broadcast-satellite-launched-in-1962/174965630?prev_url=detail.