

Untersuchung von Oberflächenschäden von Si-Sensoren durch Röntgenstrahlung

Eckhart Fretwurst, Friederike Januschek, Robert Klanner, Hanno Perrey, Joana Pintilie, Fabian Renn, Peter Schleper, Thorben Theedt

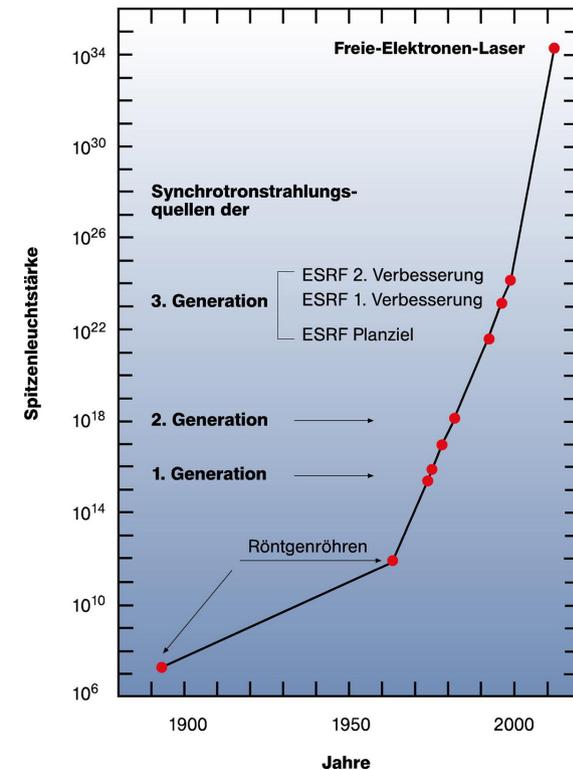
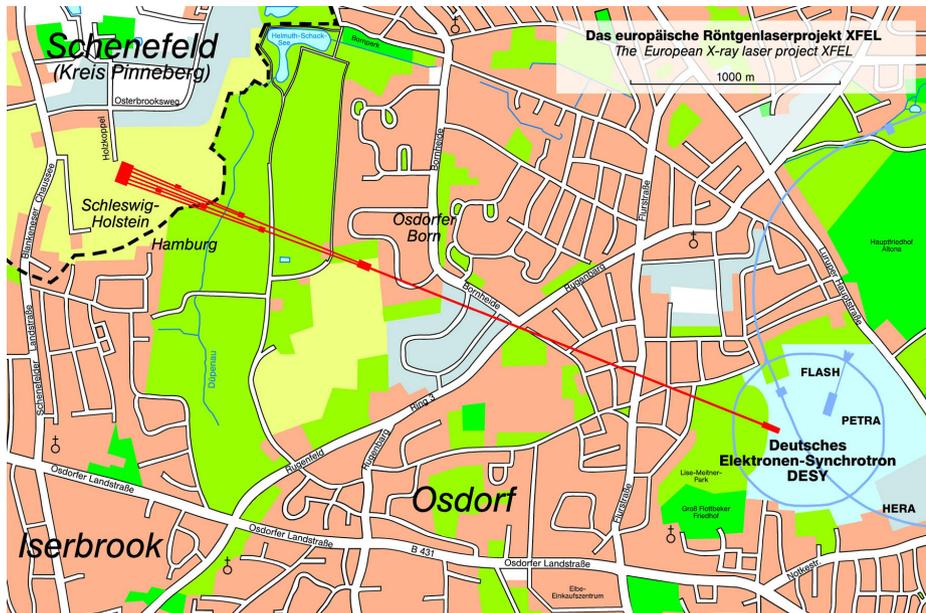
- Motivation
 - Anforderung an Strahlenhärte am XFEL
- Teststrukturen
 - 'Gate Controlled' Dioden
- Bestrahlung
 - Eigenschaften der verwendeten Strahlung
 - Experimenteller Aufbau
- Messmethoden
 - C/V, I/V und TSC Messungen
- Ergebnisse
- Ausheilung
- Zusammenfassung

Motivation

Hohe Anforderungen an Detektoren und Elektronik am XFEL

Röntgenlicht-freie-Elektronen-Laser, Inbetriebnahme geplant für 2013

- Spitzenbrillanz viele Größenordnungen über der bisheriger Röntgenquellen
- Integrierte Photonenflüsse von 10^{16} γ/cm^2 (12 keV Photonen)
- Dosis von 10^9 Gy in SiO_2



Motivation

Hohe Anforderungen an Detektoren und Elektronik am XFEL

Röntgenlicht-freie-Elektronen-Laser, Inbetriebnahme geplant für 2013

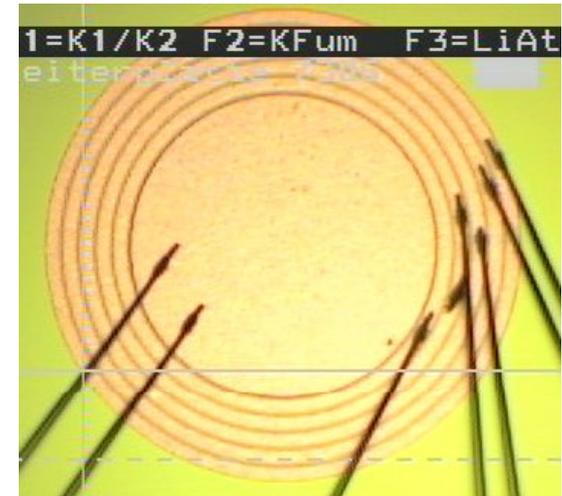
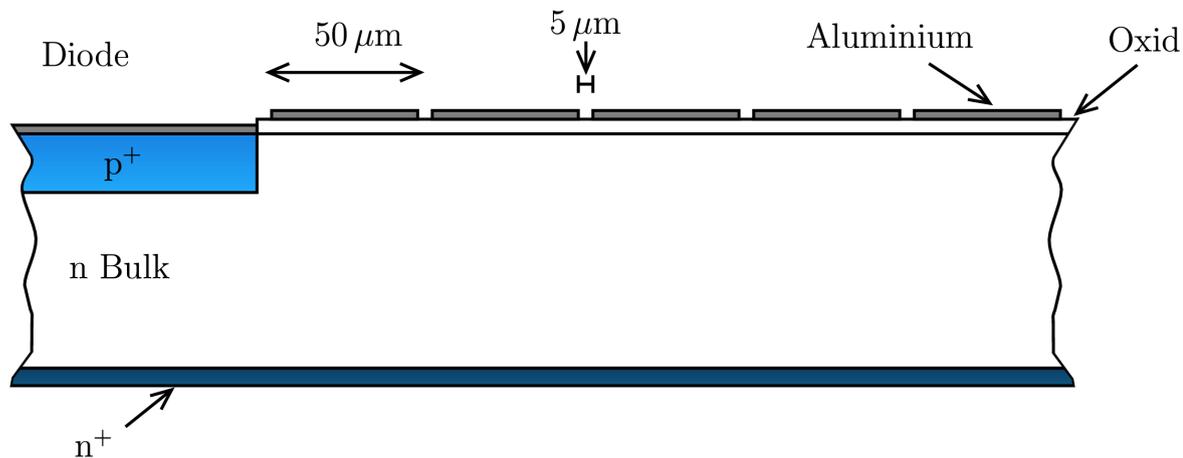
- Spitzenbrillanz viele Größenordnungen über der bisheriger Röntgenquellen
- Integrierte Photonenflüsse von 10^{16} γ/cm^2 (12 keV Photonen)
- Dosis von 10^9 Gy in SiO_2

Erwartete Effekte auf Detektoren und Elektronik

- Oberflächenschädigungen, keine Volumenschäden (ab $E_\gamma \sim 300$ keV)
- Ladungsansammlung im Oxid und am Si-SiO₂ Übergang
 - Verschiebung der Flachbandspannung
 - Aufbau hoher Feldstärken (Gefahr von Durchbrüchen)
- Schädigung am Si-SiO₂ Übergang führt zu Dunkelströmen
 - Verschlechterung des Signal/Rausch Verhältnisses
 - Entladung von Kapazitäten

Detektoren und Elektronik müssen auf Strahlenhärte getestet werden!

Teststruktur: 'Gate Controlled' Dioden



'Gate Controlled' Dioden

- n-dotiertes Substrat, Dicke: 285 μm
Geringe Dotierung, hoher spezifischer Widerstand, $\rho \sim 3.4 \text{ k}\Omega\text{cm}$
- p⁺-dotierte Diode, Durchmesser: 1 mm (Durchmesser Struktur 1.5 mm)
- Oxidschicht (SiO₂-Si₃N₄), Dicke 380 nm
- Fünf Aluminium Gate Ringe

Teststruktur ermöglicht unterschiedliche Messverfahren (C/V, I/V)

Bestrahlung

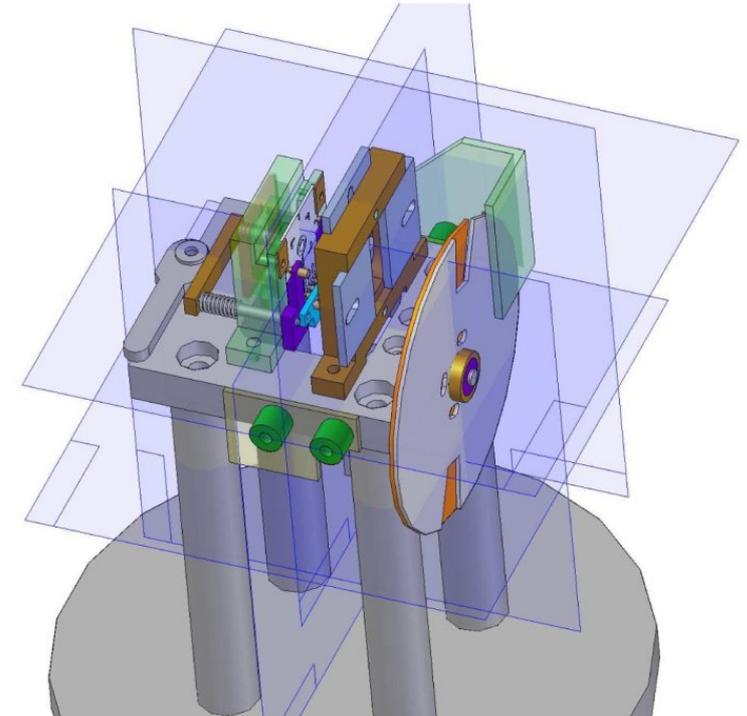
Bestrahlung am Strahlrohr F4 am HASYLAB (DESY)

Strahleigenschaften

- Synchrotronstrahlung mit einer typischen Energie von $E_\gamma \sim 10$ keV (FWHM ~ 16 keV)
- Strahlgröße: 5×2 mm²

Experimenteller Aufbau

- Chopper: Dosisrate von 0.5-150 kGy/s
- Kollimator: Bestrahlungsfläche einstellbar
- Probenhalterung: Wassergekühlt auf 20°C (Temperatur Teststruktur < 36°C)
- Aufbau mit Motor bewegbar, Probe lässt sich abscannen



Bestrahlung von 9 Dioden in mehreren Schritten bis zu Dosen von 1GGy

C/V Messung

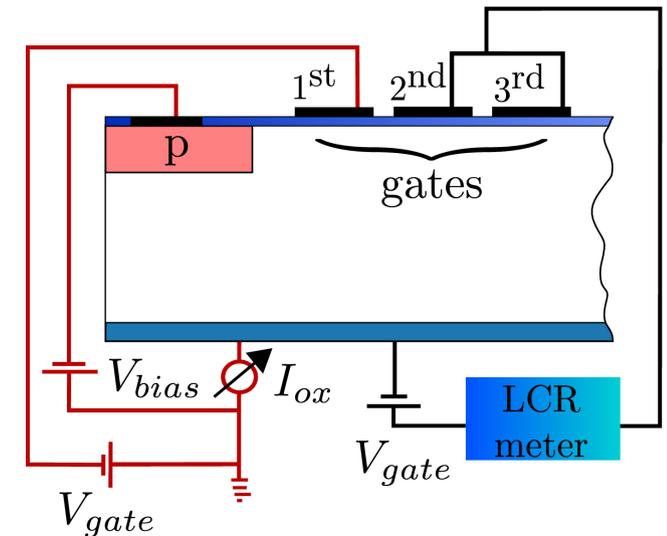
- Kapazität in Abhängigkeit der Spannung am Gate 2 und 3
- LCR-Meter misst Kapazität bei Frequenz f

Messung sensitiv auf: Oxid-Ladungsdichte (N_{ox}),
Dichte der Interface-Energiezustände (D_{it})

I/V Messung

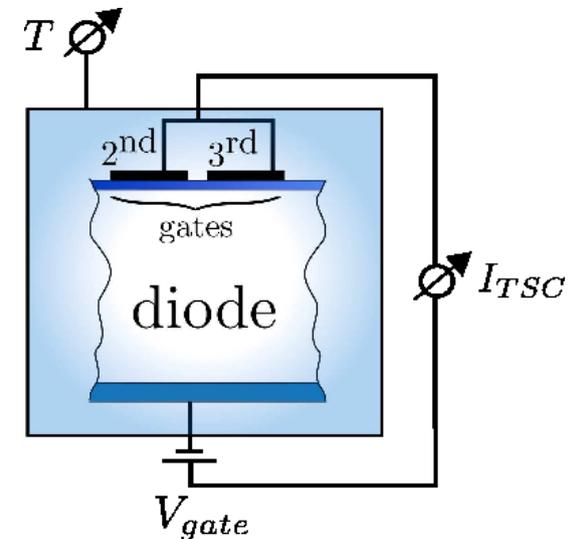
- Strom durch Diode als Funktion der Spannung am ersten Gate
- Konstante Bias-Spannung an Diode

Messung sensitiv auf Oberflächenstrom (I_{ox})



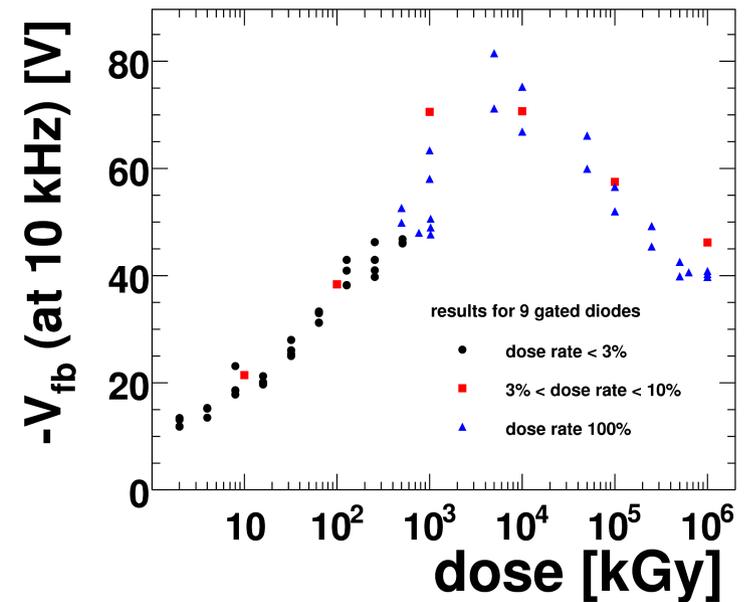
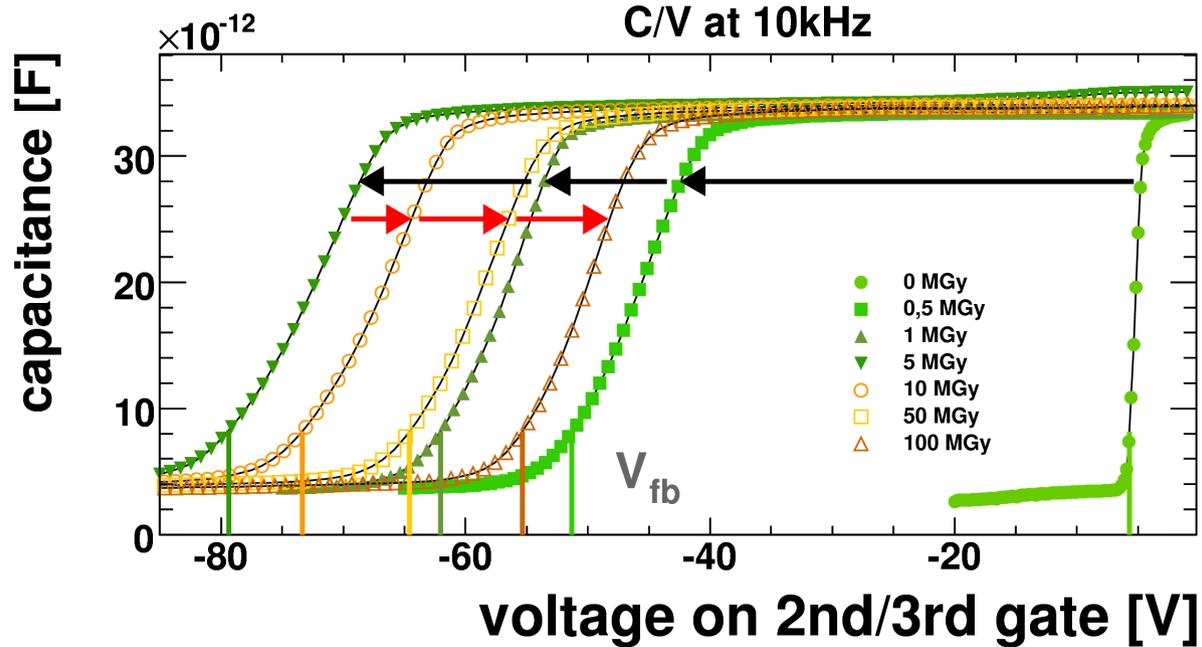
TSC ('Thermal Stimulated Current'):

- Diode wird in Akkumulation auf 30°K gekühlt, Interface-Energiezustände (Traps) sind gefüllt
- Umschalten auf Verarmungsspannung
- Aufwärmen der Diode in Verarmung bei konstanter Heizrate
 - Abscannen der Bandlücke mit Fermi-niveau
 - Ladungen 'springen' ins Leitungsband
 - Messe Strom als Funktion der Temperatur



Messung sensitiv auf Dichte der Interface-Zustände (D_{it}) und deren Lage in der Bandlücke

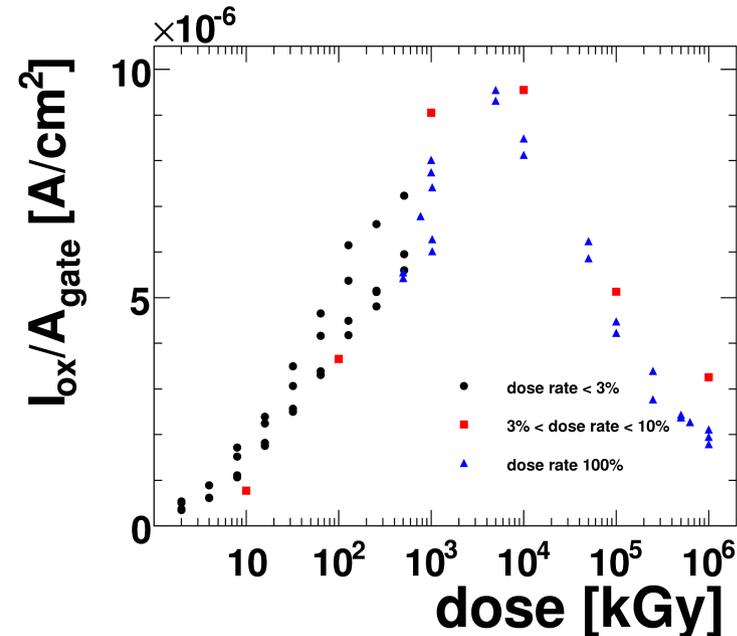
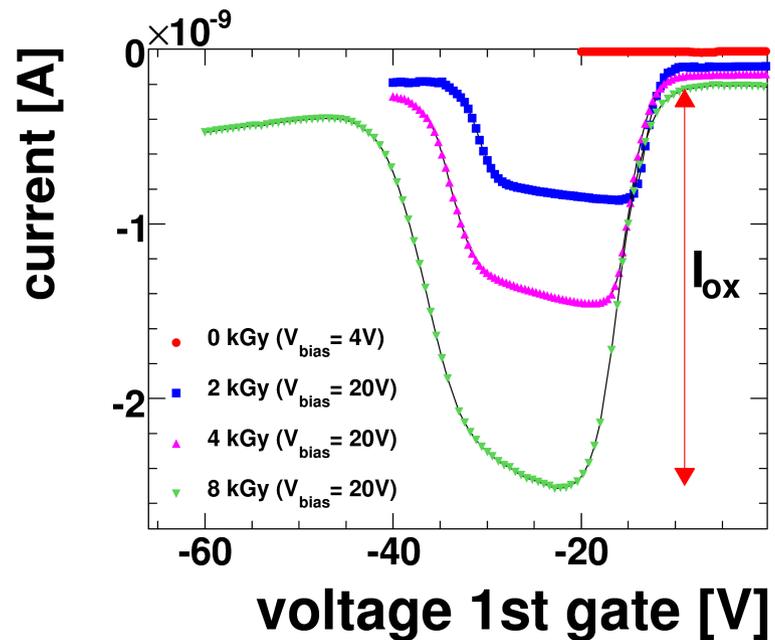
Ergebnisse: C/V Messung



- Kapazität als Fkt. der Gate-Spannung für verschiedene Dosen
- Durch Bestrahlung Verschiebung zu größeren, negativen Spannungen
- Für Dosen größer 5 MGy nimmt die Verschiebung wieder ab

- V_{FB} als Fkt. der Dosis
- Maximum bei ca. 5 MGy
- Abfall zu höheren Dosen
- Verhalten unabhängig von Dosisrate

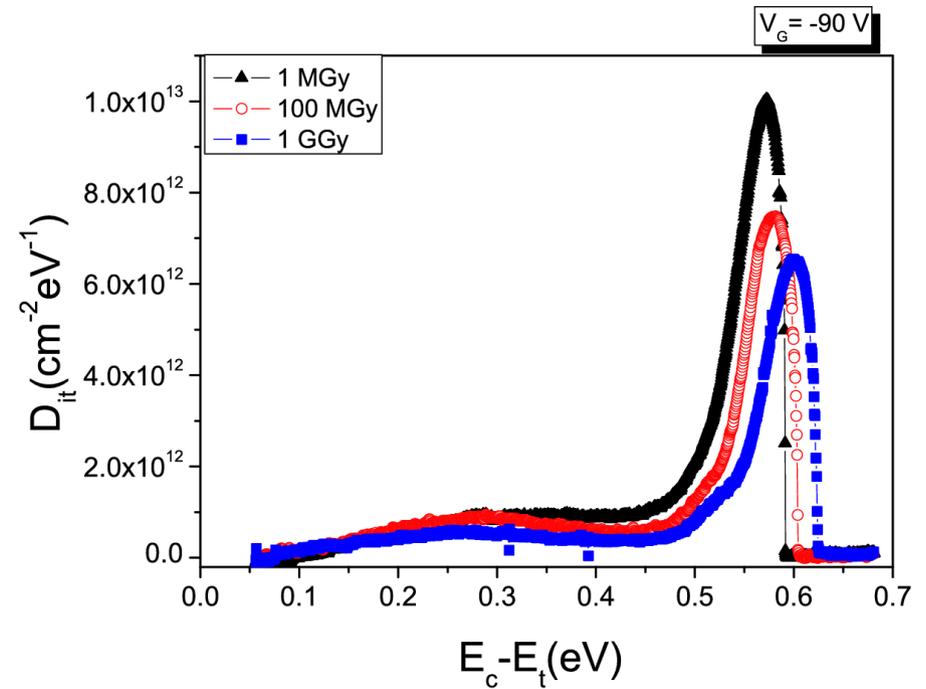
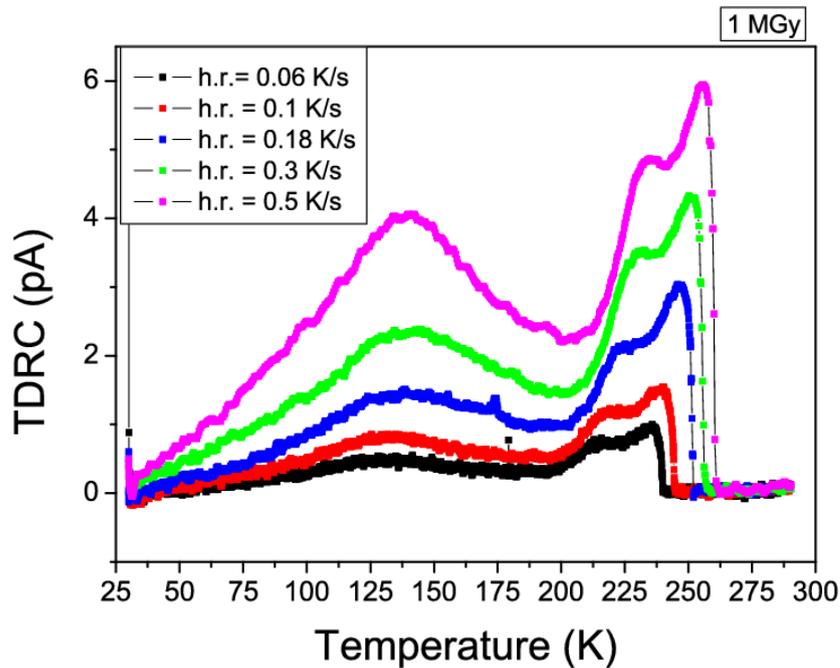
Ergebnisse: I/V Messung



- I/V Messungen einer Diode nach verschiedenen Bestrahlungsschritten
- Anstieg des Oberflächenstroms durch Bestrahlung um mehrere Größenordnungen

- Stromdichte $I_{\text{ox}}/A_{\text{gate}}$ als Fkt. der Dosis
- Starker Anstieg bis ca 5 MGy
- Danach Abnahme um Faktor 5
- Kurvenverlauf unabhängig von Dosisrate

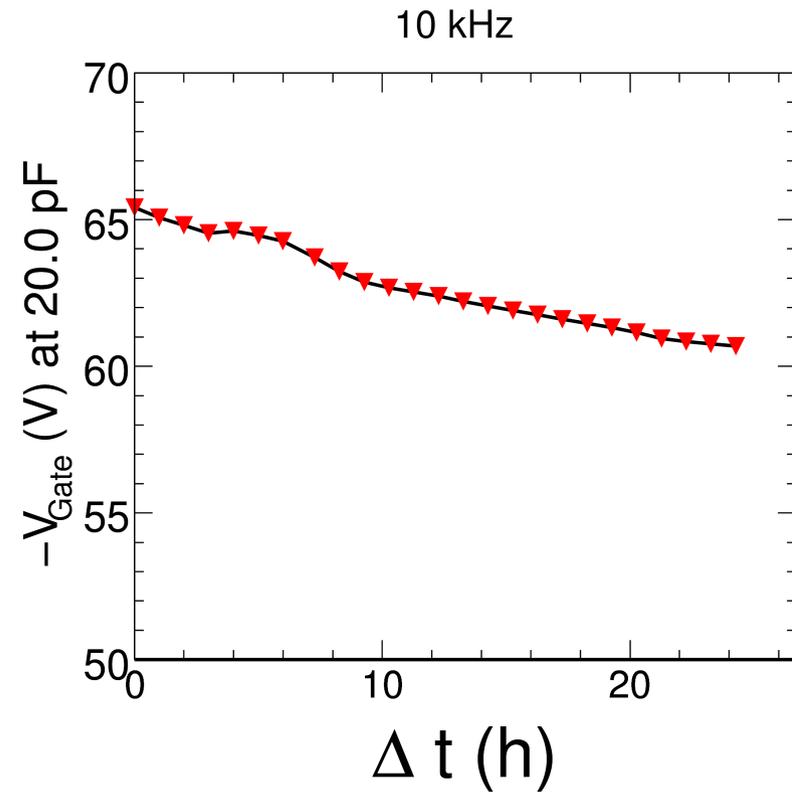
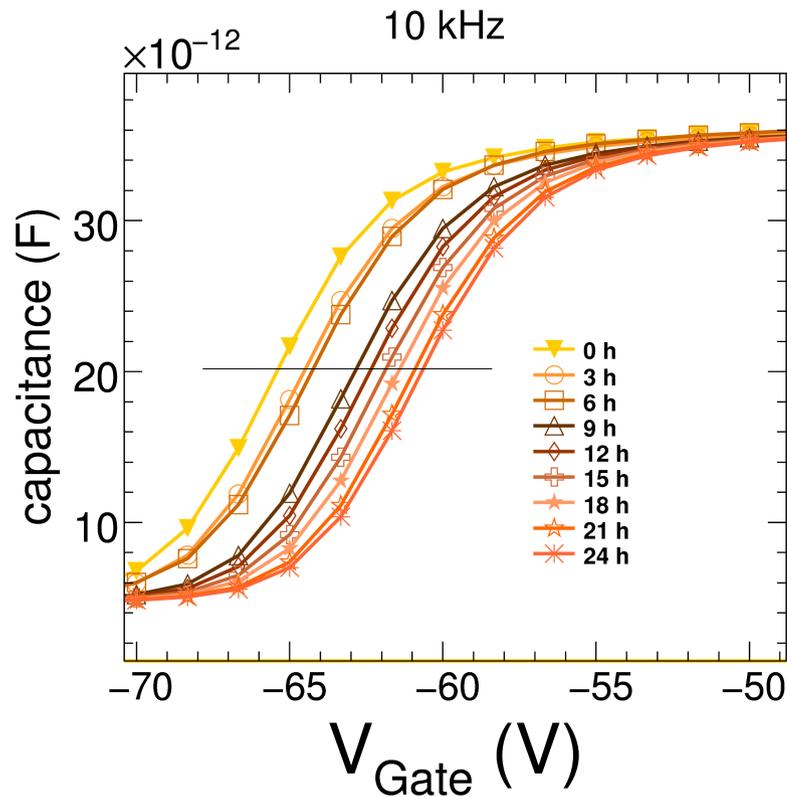
Ergebnisse: TSC Messung



- TSC Signal als Fkt. der Temperatur für 1MGy Diode
- Umrechnung des Stroms in Dichte der Interface-Zustände
- Umrechnung der Temperatur in $E_c - E_t$ (Position in Bandlücke)

- Mehrzahl der Interface-Zustände liegt nahe der Bandlückenmitte
- D_{it} nimmt mit steigender Dosis ab
- Konsistent mit Abnahme der Verschiebung von V_{FB} und Abnahme von I_{ox}

Ausheilungseffekte



- 5 MGy Diode kurz nach Bestrahlung
- Stündliche C/V Messung über 24 h

- $V_{\text{Gate}}(C=20\text{pF})$ als Fkt. der Zeit
- Verschiebung geht mit Zeit zurück

Ausheilungseffekte schon bei Raumtemperatur auf Zeitskala von Stunden erkennbar

Zusammenfassung

- 'Gate Controlled' Dioden wurden mit Dosen bis zu 1 GGy bestrahlt
- Untersuchung mit C/V und I/V Messungen:
 - Verschiebung der C/V Kurven und Oberflächenstrom I_{ox} haben ein Maximum bei ~ 5 MGy und nehmen zu höheren Dosen hin ab
- TSC Messungen:
 - Dichte der Interface-Energiezustände nimmt mit steigender Dosis ab
 - Konsistent mit Abnahme der Verschiebung von V_{FB} und Abnahme von I_{ox} bei Dosen > 5 MGy
- Ausheilungseffekte schon bei Raumtemperatur auf Zeitskala von Stunden erkennbar