

Analyse der durch tiefe bestrahlungsinduzierte Zentren hervorgerufenen dynamischen Impatt-Oszillation

Ralf Siemieniec¹, Josef Lutz²

¹TU Ilmenau, Fachgebiet Festkörperelektronik, PF 100565, 98684 Ilmenau

²TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 09107 Chemnitz

1 Entstehung der Impatt-Oszillation

Dynamische Impatt (Impact Ionization Transit Time) - Oszillationen werden durch temporär positiv geladene donatorische Störstellen, H(195K) oder auch als K-Zentrum bezeichnet, verursacht [7]. Diese Störstellen entstehen als Nebeneffekt bei der Bestrahlung von Silizium-Bauelementen mit Elektronen, Protonen oder Heliumkernen zum Zweck der Trägerlebensdauereinstellung. Abbildung 1 zeigt die Messung einer Impatt-Oszillation an einer elektronenbestrahlten pin-Diode der Spannungsklasse 1200V.

Die Schwingungen treten beim Abschalten des Bauelementes auf. Zu diesem Zeitpunkt sind alle donatorartigen Störstellen positiv geladen und addieren sich zur Grunddotierung. Dadurch wird die Avalanche-Durchbruchspannung herabgesetzt und es kommt zur Generation von Elektronen in der Nähe des pn-Überganges. Die generierten Elektronen reduzieren jetzt wiederum die effektive Dotierung, so daß die Avalanche-generation von Ladungsträgern beendet wird. Aufgrund des anliegenden elektrischen Feldes werden jetzt die Elektronen in Richtung n-Kathode abtransportiert, es kommt erneut zum Ansteigen der effektiven Dotierung und der Prozeß beginnt von vorn. Die Frequenz der Schwingung wird durch die Weite des durchlaufenen Gebietes und die Laufzeit der Elektronen bestimmt. Abbildung 2 zeigt links eine simulierte Impattoszillation und rechts die Phase, in welcher die Schwingungen einsetzen.

Abbildung 3 zeigt links die Elektronendichte im Bauelement zu verschiedenen Zeitpunkten mit verschiedenen Zuständen des Durchlaufens der Ladungsträger. Mit zunehmender Zeitdauer entladen sich die Zentren H(195K), dargestellt in Abbildung 3 rechts, bis das Bauelement wieder in der Lage ist, die angelegte Spannung

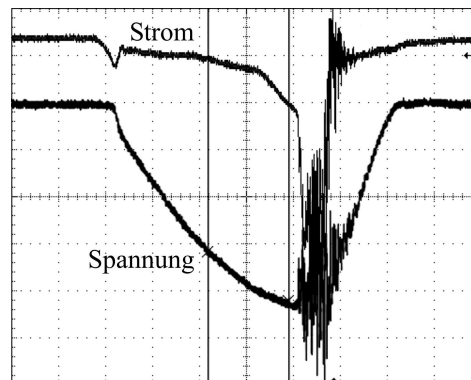


Abbildung 1: Messung einer Impatt-Oszillation an einer elektronenbestrahlten Diode ($E = 4.5 \text{ MeV}$, $d = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$), $T = 280 \text{ K}$, $V_R = 910 \text{ V}$, $I_F = 5 \text{ A}$ (20 A/div , 200 V/div , 200 ns)

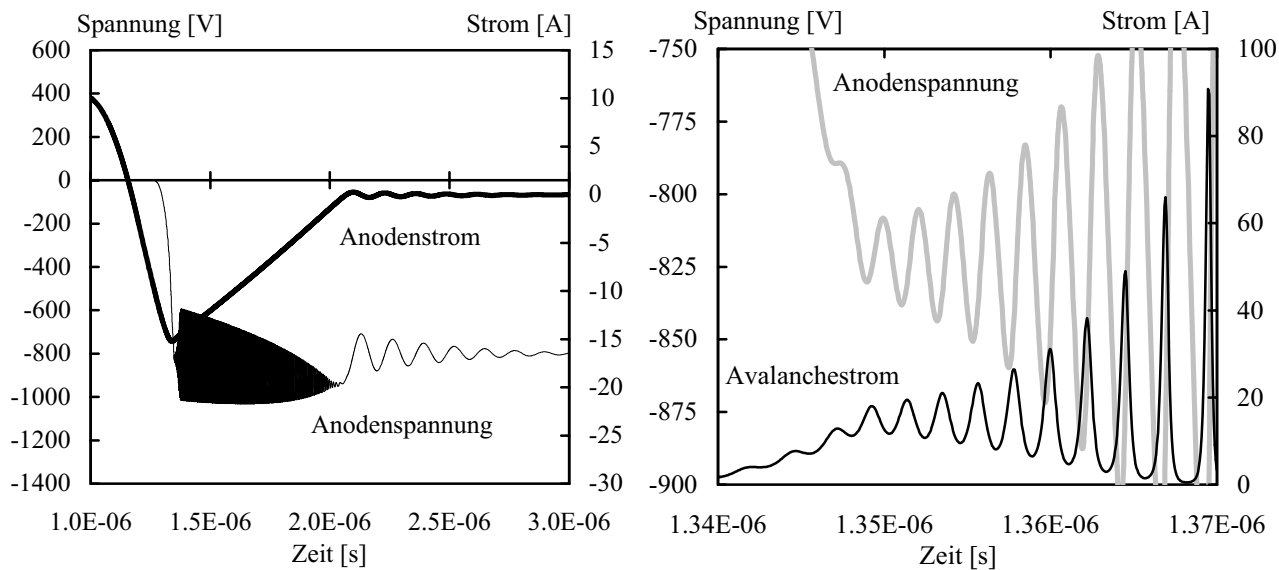


Abbildung 2: Simulation einer Impattoszillation und Einsatzphase der Schwingungen anhand einer elektronenbestrahlten Diode ($E = 4.5\text{MeV}$, $d = 1 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-2}$), $T = 300\text{K}$, $V_R = 800\text{V}$, $I_F = 10\text{A}$

aufzunehmen - die Schwingungen werden beendet. Die Einsatzspannung dieser Schwingungen hängt von der Temperatur und der vorliegenden Konzentration der donatorartigen Störstelle ab.

2 Simulationsmodell und Parameter

Bestrahlungsverfahren führen unter den hier gewählten Bedingungen zur Entstehung dreier, voneinander unabhängiger, für Rekombinationsvorgänge relevanter Störstellen innerhalb der verbotenen Zone des Halbleiters, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist. Für eine korrekte Beschreibung der Rekombinationsvorgänge, Grundvoraussetzung für die Berücksichtigung von dynamischen Effekten wie der Impattschwingung, ist es daher notwendig, alle relevanten Störstellen sowie deren zeitliche Umladung zu berücksichtigen. Es wird ein in den Bauelementesimulator TeSCA implementiertes Modell eingesetzt, welches auf Ratengleichungen basiert und

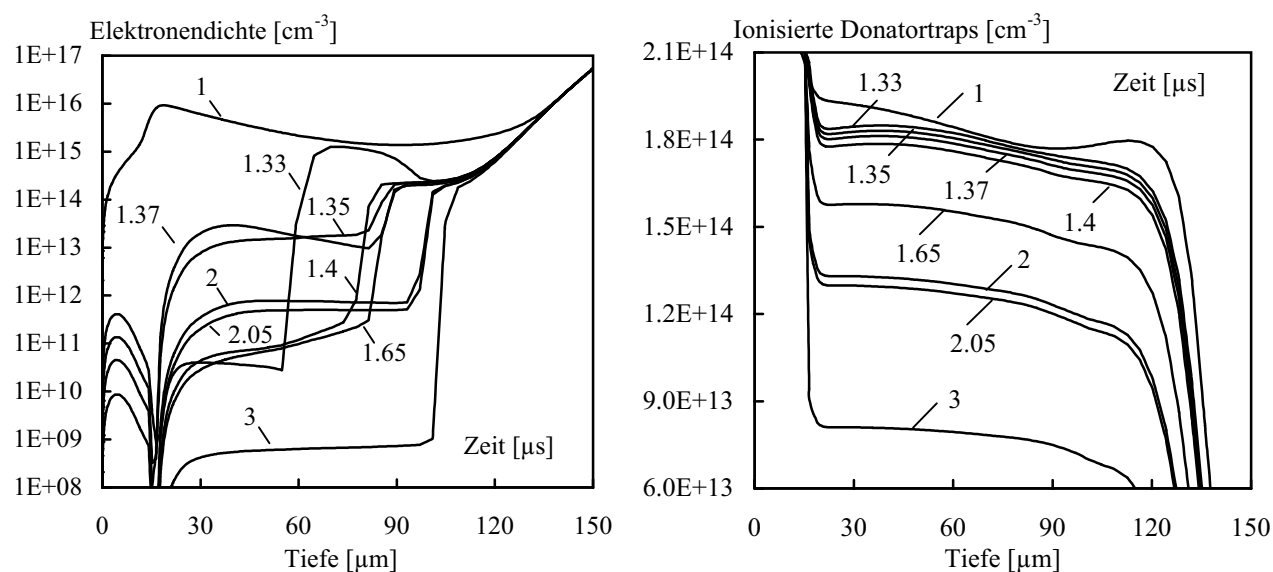


Abbildung 3: Elektronendichte (links) und Dichte der geladenen Donatoren (rechts) während der Impattoszillation

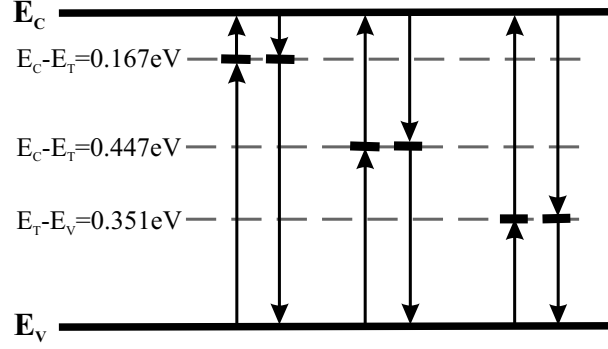


Abbildung 4: Rekombination über drei unabhängige Störstellen

mehrere Störstellen sowie deren lokale Verteilung im Bauelement berücksichtigt [2, 10]. Für die Simulation müssen die folgenden Parameter bekannt sein: die energetische Lage der Störstelle E_T , die Störstellenkonzentration N_T und die (temperaturabhängigen) Einfangraten für Elektronen c_n und Löcher c_p sowie die entsprechenden Entropiefaktoren χ_n und χ_p . Tabelle 1 gibt eine Übersicht der in die Simulation einbezogenen Rekombinationszentren, deren energetischer Lage sowie deren Einfangraten [10, 11].

3 Untersuchungen an Bauelementen mit homogener Lebensdauereinstellung

Dynamische Impatt-Oszillationen wurden zuerst an mit hohen Dosen bei einer Energie von 4.5MeV elektronenbestrahlten Freilaufdioden gefunden [7].

Erst mit der Implementierung des vorstehend beschriebenen Multitrap-Rekombinationszentrums und der Ermittlung zuverlässiger Zentrenparameter wurde es möglich, daß stationäre und dynamische Verhalten von Leistungsbauelementen nach Trägerlebensdauereinstellung durch Bestrahlung weitestgehend korrekt zu simulieren [10, 11]. Aufbauend auf den erreichten Resultaten wurde die Devicesimulation erstmals auch für die Bestimmung der Einsatzspannung von Impatt-Oszillationen eingesetzt [9].

Für eine einfache und schnelle Simulation der Einsatzspannung der Impatt-Oszillation wurde eine Reihenschaltung aus einem zeitveränderlichen Widerstand, einer Induktivität von $7\mu H$ und einer diskretisierten Freilaufdiode verwendet, an die zunächst eine Spannung in Flußrichtung angelegt wird. Anschließend wird die Sperrspannung angelegt und das transiente Verhalten der Anordnung berechnet. Die Einsatzspannung läßt sich dann aus dem Beginn der Schwingungen im Spannungs- und Avalanche-Stromverlauf bestimmen (siehe Abbildung 2 rechts). Meßtechnisch wurde die Einsatzspannung mit Hilfe von Doppelpuls-Messungen bestimmt.

Die Untersuchungen erfolgen für Freilaufdioden, welche mit unterschiedlichen Dosen bei einer Energie von 4.5MeV elektronenbestrahlt wurden. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Abhängigkeiten sowie zusätzlich den Verlauf, welcher mit Hilfe eines vereinfachten analytischen Modells auf Basis

	$E_C - E_T$ [eV]	Elektroneneinfangrate c_n [cm ³ s ⁻¹]	Löchereinfangrate c_p [cm ³ s ⁻¹]
E(90K)	0.167	$1.15 \cdot 10^{-7} \exp\left(-\frac{T}{355.4K}\right)$	$6.39 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{300K}} \exp\left(\frac{6.15 \cdot 10^{-3} eV K}{k_B T}\right)$
E(230K)	0.447	$3.41 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{T}{300K}} \exp\left(\frac{22.13 \cdot 10^{-3} eV K}{k_B T}\right)$	$2.79 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{T}{300K}} \exp\left(-\frac{22.13 \cdot 10^{-3} eV K}{k_B T}\right)$
H(195K)	0.769	$9.85 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{T}{300}} \exp\left(-\frac{85 \cdot 10^{-3} eV K}{k_B T}\right)$	$4.3 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{T}{300K}}$

Tabelle 1: Übersicht der für die Simulation genutzten Zentrenparameter

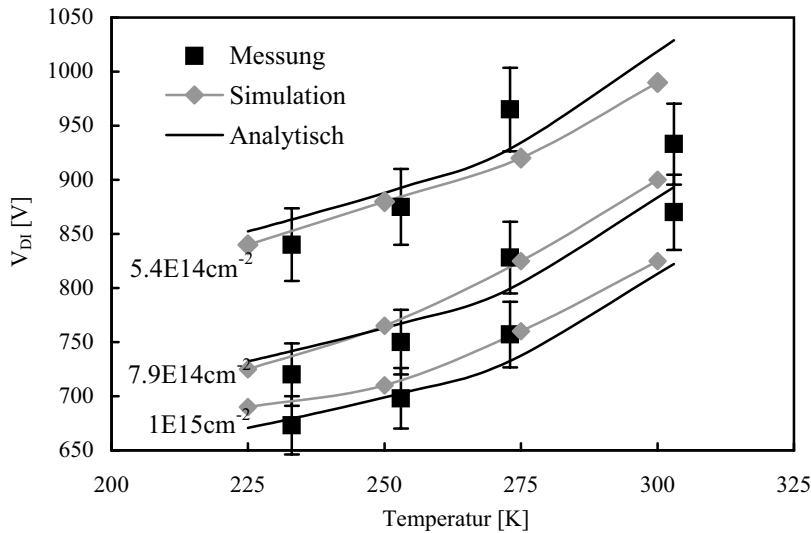


Abbildung 5: Einsatzspannung der Impattoszillation für elektronenbestrahlte Dioden ($E=4.5\text{MeV}$)

eines dreieckförmigen Feldverlaufes und eines abrupten pn-Überganges berechnet wurde [7]. Insgesamt zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulation, die Bauelementesimulation ermöglicht somit das Vermeiden des Einsetzens von Impattoszillationen bei der Entwicklung lebensdauereingestellter Bauelemente.

4 Untersuchungen an Bauelementen mit inhomogener Lebensdauereinstellung

Neben einer homogenen Absenkung der Trägerlebensdauer ist es in vielen Fällen erforderlich, die Lebensdauer der Ladungsträger nur lokal zu verändern. Möglichkeiten dazu bietet die Bestrahlung mit Wasserstoff- oder Heliumkernen, in deren Ergebnis eine Verringerung der Trägerlebensdauer im Gebiet der Reichweite der Ionen zu verzeichnen ist. Angewendet werden Verfahren zur lokalen Einstellung der Trägerlebensdauer z.B. zum Erzielen eines soften Recovery-Verhaltens bei Freilaufdioden in Verbindung mit einer homogenen Lebensdauereinstellung [6] oder durch Kombination mit einer zweiten lokalen Trägerlebensdauereinstellung [5] sowie zur Optimierung der Eigenschaften von Hochspannungs-PT-IGBT [8].

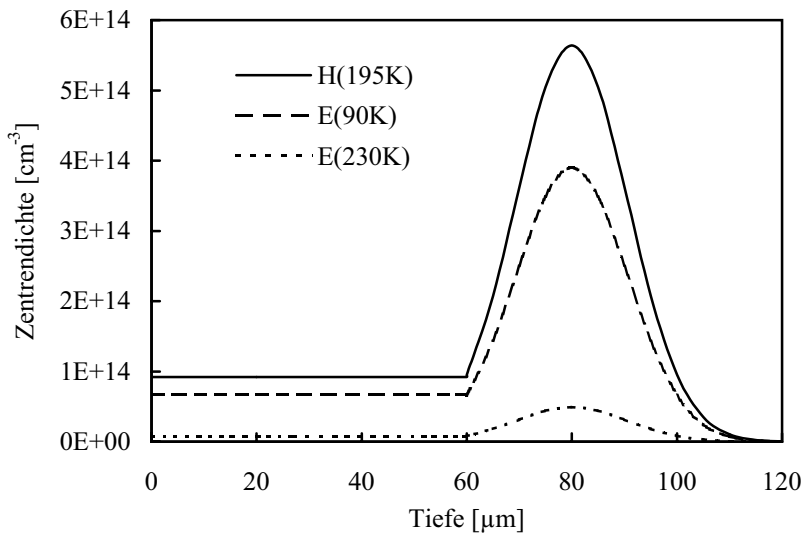


Abbildung 6: Angenommenes Zentrenprofil für eine Helium-Dosis von $2.1 \cdot 10^{12}\text{cm}^{-2}$

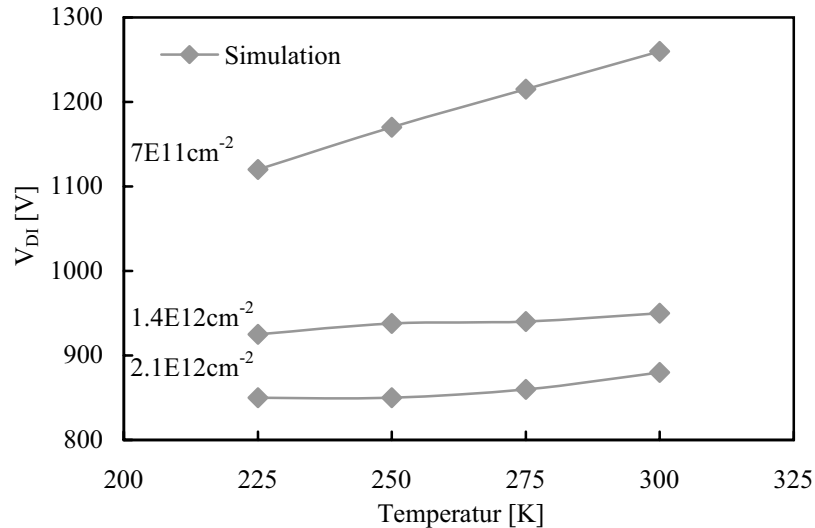


Abbildung 7: Einsatzspannung der Impattoszillation für heliumbestrahlte Dioden (E=11MeV)

Es ist daher von Interesse, ob Impatt-Oszillationen auch in Bauelementen mit lokaler Einstellung der Ladungsträgerlebensdauer auftreten können. Kritisch ist hier vor allem der Fall von Zentrenprofilen mit vergleichsweise hoher Eindringtiefe, da ebenfalls im Gebiet vor dem Störstellenpeak Zentren generiert werden. Die Untersuchungen erfolgen auf Basis der gleichen 1.2kV pin-Diodenstruktur. Es wurde ein durch Heliumbestrahlung erzeugtes Zentrenprofil mit einer Peakposition von ca. $60\mu\text{m}$ in der eigenleitenden Zone der Diode angenommen, was im Falle dieser Struktur eine Bestrahlungsenergie von ungefähr 11MeV erfordert. Eine Abschätzung der resultierenden Zentrenprofile erfolgte auf Basis eigener Profilmessungen sowie anhand von Literaturdaten [1, 3, 4]. Die Bestrahlungsdosen wurden so gewählt, daß die Flußspannung der Dioden weitestgehend im üblichen Bereich erhältlicher Freilaufdioden dieser Spannungsklasse liegt. Abbildung 6 zeigt die in der Simulation genutzten Profile für die einzelnen Zentrenspezies im Falle einer Bestrahlungsdosis von $2.1 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$.

Für derartige Zentrenprofile zeigt die Simulation ebenfalls das Auftreten von Impatt-Oszillationen. Abbildung 7 gibt eine Übersicht über die errechnete Einsatzspannung in Abhängigkeit der Temperatur für drei verschiedene Dosen. Bei hohen Zentrenkonzentrationen wird nur eine flache Temperaturabhängigkeit der Einsatzspannung festgestellt. Unter diesen Bedingungen wirken die temporär positiv geladenen Zentren offenbar ähnlich wie ein n-Buffer, so lange die Zahl der geladenen Störstellen hoch genug ist. Hier sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Literatur

- [1] L. Frey, S. Bogen, and M. Herden. Deep Implants For Semiconductor Device Applications. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 140:87–101, 1996.
- [2] H. Gajewski, B. Heinemann, and H. Langmach. *TeSCA-Handbuch*. Weierstrass-Institut für Mathematik, 1991.
- [3] P. Hazdra, J. Rubes, and J. Vobecky. Divacancy profiles in MeV helium irradiated silicon from reverse I-V measurement. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 159:207–217, 1999.
- [4] P. Hazdra and J. Vobecky. Application of High Energy Ion Beams for Local Lifetime Control in Silicon. In *Materials Science Forum*, pages 225–228, 1997.
- [5] O. Humbel, N. Galster, and F. Bauer. 4.5 kV-Fast-Dioden with Expanded SOA Using a Multi-Energy Proton Lifetime Control Technique. In *Proc. ISPSD*, pages 121–124, 1999.
- [6] J. Lutz and U. Scheuermann. Advantages of the new Controlled Axial Lifetime Diode. In *Proc. PCIM*, 1994.

- [7] J. Lutz, W. Südkamp, and W. Gerlach. Impatt Oscillations in Fast Recovery Diodes due to Temporarily Charged Radiation-Induced Deep Levels. *Solid-State Electronics*, 42(6):931–938, 1998.
- [8] M. Mori, H. Kobayashi, and T. Saiki. 3.3kV Punchthrough IGBT with Low Loss and Fast Switching. In *Proc. ISPSD*, pages 229–232, 1997.
- [9] R. Siemieniec and J. Lutz. Axial Lifetime Control by Radiation Induced Centers in Fast Recovery Diodes. In *Proc. ISPS*, pages 83–91, Prag, 2002.
- [10] R. Siemieniec, W. Südkamp, and J.Lutz. Determination of Parameters of Radiation Induced Traps in Silicon. *Solid-State Electronics*, 46(6):891–901, 2002.
- [11] R. Siemieniec, W. Südkamp, and J. Lutz. Applying Device Simulation for Lifetime-Controlled Devices. In *Proc. ICCDCS*, Aruba, 2002.