

DISS. ETH Nr. 25529

Excess Carrier Generation in Silicon Carbide Devices

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
SELAMNESH NIDA

Bachelor Of Arts - Physics., Smith College
Masters of Electrical Engineering - University of Notre Dame
born 08. July 1985,
citizen of Ethiopia

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ulrike Grossner, examiner
Prof. Dr. Andreas Schenk, co-examiner
Dr. Andrei Konstantinov, co-examiner

Dec 12, 2018

Abstract

Excess carriers are generated in semiconductors when valence electrons get excited to the conduction band. This can occur by impact ionization when the applied electric field surpasses a critical value. In power MOSFETs, this leads to the loss of blocking capability. Thus, accurate modeling of excess carrier generation by impact ionization is necessary. Impact ionization models are available for silicon as it is the most widely used material. However, the critical electric field and the critical temperature of silicon are much lower than that of wide band gap materials such as 4H-SiC. To accurately model generation in 4H-SiC, impact ionization models need to be adapted to higher temperatures as well as include anisotropy. In this work, the generation rate of carriers in 4H-SiC due to impact ionization is discussed. An improved model is proposed that can be applied at high temperatures and is also adapted to include anisotropy of 4H-SiC. Compared with the state-of-the-art models for 4H-SiC where calibrations are necessary at various temperatures and crystal orientations, the proposed model is sufficient to calibrate 1D test structures at room temperature and apply in 2D simulations at any temperature. This model is important since the generation of excess carriers by impact ionization in 4H-SiC MOSFETs eventually leads to irreversible failure of devices. Irreversible destruction occurs because secondary mechanisms are triggered as the device self heats during avalanche. In this thesis, the secondary mechanisms are discussed and simulation as well as experimental results are used to show the influence of these mechanisms in limiting the avalanche capability of commercial 1.2 kV 4H-SiC MOSFETs. Further simulation studies are performed and device structures that improve the ruggedness of power MOSFETs are recommended. In addition, comparison of avalanche ruggedness of trench and planar MOSFETs is performed to show the influence of device architecture on avalanche processes. It is shown that trench devices provide promising alternative for high avalanche current capability but would need technological improvement in gate oxide reliability. On the other hand, though excess carrier generation is undesired in power MOSFETs, it is utilized as signal amplification

in beam position monitor applications. Simulation studies are shown and confirmed by measurements done at the Swiss Light Source that 4H-SiC is a viable alternative to the state-of-the-art diamond monitors in the ≥ 5 keV X-ray energy. Overall, this work presents a comprehensive overview of impact ionization in 4H-SiC in various applications and improved modeling of this process.

Abstract

Das Verhalten bei der Erzeugung von überschüssigen Ladungsträgern unter dem Einfluss eines hohen elektrischen Feldes ist kritisch für das Design von leistungselektronischen Bauteilen sowie der Beurteilung ihrer Zuverlässigkeit. Daher ist eine genaue Modellierung deren Erzeugung unter für eine Fehleranalyse relevanten Bedingungen erforderlich. In dieser Arbeit wird die Erzeugung von Ladungsträgern durch Stossionisation diskutiert. Es wird ein verbessertes Modell vorgeschlagen, das für hohe Temperaturen anwendbar ist, welche bei zerstörenden Fehlern relevant sind. Das Modell wird auf ein Material mit hoher Bandlücke, 4H-SiC, angewendet, das für Hochspannungsanwendungen besser geeignet ist als Silizium. In dieser Hinsicht ist das Modell auch so angepasst, dass es die Anisotropie von 4H-SiC einschliesst, die für die 2D-Geräteanalyse verwendet wird. Im Vergleich zu den zur Zeit verfügbaren Modellen, bei denen die Kalibrierungen bei verschiedenen Temperaturen und Kristallorientierungen erforderlich sind, wird das vorgeschlagene Modell nur bei Raumtemperatur kalibriert und die bereits vorhandenen Anisotropiedaten können dann in 2D-Simulationen bei jeder Temperatur verwendet werden. Dies ist wichtig, da die Erzeugung von überschüss-Ladungsträgern durch Stossionisation in 4H-SiC-MOSFETs schliesslich zu einer irreversiblen Zerstörung der Bauelemente führt. Irreversible Zerstörung tritt auf, weil sekundäre Mechanismen ausgelöst werden, wenn sich das Bauteil während des Lawinendurchbruchs selbst erwärmt. In dieser Arbeit werden die zweiten Durchschlagsmechanismen diskutiert und Simulationen sowie experimentelle Ergebnisse werden gezeigt, um die Leistungsfähigkeit kommerzieller 1,2kV 4H-SiC MOSFETs zu verstehen. Weitere Simulationsstudien wurden durchgeführt und Bauelementstrukturen, die die Robustheit von Leistungs - MOSFETs verbessern, werden empfohlen. Zusätzlich wurde ein Vergleich der Lawinendurchbruchsstabilität von Trench - und Planar - MOSFETs durchgeführt, um den Einfluss der Bauelementarchitektur zu zeigen. Es wird gezeigt, dass Trench - Bauelemente eine vielversprechende Alternative für eine hohe Lawinenstrom - Fähigkeit darstellen, jedoch eine technologische Verbesserung der Gate- Oxid -

Zuverlässigkeit benötigen würden. Zusätzlich wird die Verwendung von überschüss-Ladungsträgern, die durch Stossionisation erzeugt werden, für Strahlpositions-überwachungsanwendungen diskutiert. Simulationssstudien zeigen, dass 4H-SiC eine praktikable Alternative zu den modernsten Diamantmonitoren im ≥ 5 keV Röntgenenergiebereich darstellt. Insgesamt bietet diese Arbeit einen umfassenden Überblick über die Stossionisation in 4H-SiC in verschiedenen Anwendungen sowie eine verbesserte Modellierung dieses Prozesses.