

Diss. ETH No. 16759

Mobility and Impact Ionization in Silicon at High Temperature

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
CHIARA CORVASCE
Dipl.-Phys. University of Bari
born March 31st 1970
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Wolfgang Fichtner, examiner
Prof. Dr. Giorgio Baccarani, co-examiner

2006

Abstract

In harsh electrical environments, highly energetic pulses can randomly occur at the pins of the integrated circuit. As a result, the local high power dissipation causes a huge increase of the internal temperature, which can approach the melting point of the semiconductor material, leading to an irreversible degradation of the device properties. The empirical rules used at the present for the design of robust devices operating in such environments, require extensive testing procedures and several development cycles. Nowadays neither commercially available experimental techniques nor simulation tools do offer the high degree of confidence needed for proper reliability and device lifetime predictions in high current and high temperature regime. One way to improve the device robustness is to use predictive simulations as a basic design tool for the reliability estimation.

In the field of the high-temperature modelling and simulation of semiconductor devices, most of the physical models available to date have been validated only to 400 K, in spite of the fact that the local heating during the stress event can lead to local temperatures well in excess of this limit. This work deals with the mobility and the impact ionization in silicon at high temperature. The study is focused on the experimental determination of these physical parameters and on the extension of the experimental temperature range.

In order to reach the required temperature range, proper device architectures and materials have been developed, new technology solutions for wire bonding and packaging have been used and measurement procedures and equipments have been optimized. Both the design of the test structures and the extraction of the physical parameters have been assisted by two- and three-dimensional simulations to improve

the accuracy and to extend the useful temperature range.

The mobility has been measured by the Hall technique up to 1000 K thanks to the use of dedicated Ti/TiN interconnections in combination with junction-free van der Pauw resistors, which are intrinsically immune of spurious thermal leakage currents. A new extraction methodology has been proposed to account for the ambipolar conduction and, in particular, for the reduced Hall voltage in lightly doped silicon due to the conduction of minority carriers.

The hole and the electron impact ionization coefficients have been determined as a function of the electric field up to 673 K and 613 K, respectively, by measurements of the multiplication factor in bipolar and static induction transistors. The accurate determination of the hole impact ionization coefficient has required the development and the validation of an extraction methodology capable to account for the self-heating effect in the impact region.

The results collected in this work represent an extensive reference data set, which is suitable for the calibration of compact models for numerical simulation. In particular, these experimental data have been used here for extending the temperature validity range of the University of Bologna models, which have been originally developed for high temperature simulations. Several case studies are discussed to demonstrate the accuracy of the calibrated models for the simulation of device operations at high temperature.

Riassunto

In ambienti ostili, dove il circuito integrato può casualmente subire l'applicazione di impulsi ad alta energia, l'alta potenza elettrica dissipata localmente induce un forte aumento della temperatura che può raggiungere il punto di fusione del semiconduttore. Ciò comporta il degrado irreversibile del dispositivo. Le regole empiriche che vengono usate attualmente per la progettazione di dispositivi robusti, richiedono estese procedure di verifica sperimentale e diversi cicli di sviluppo. Attualmente, nè le tecniche sperimentali disponibili in commercio, nè gli strumenti di simulazione riescono ad offrire l'alto grado di accuratezza necessaria per stimare correttamente l'affidabilità e il tempo di vita dei dispositivi in condizioni di alte correnti ed alte temperature. Un modo per migliorare la robustezza del dispositivo è usare simulazioni predittive avanzate come strumento base di progettazione per la stima dell'affidabilità .

Nel campo della modellizzazione e simulazione ad alta temperatura di dispositivi a semiconduttore, la maggior parte dei modelli fisici disponibili ad oggi sono stati validati solo per temperature inferiori a 400 K, a dispetto del fatto che il riscaldamento locale durante l'evento di stress possa portare la temperatura a valori ben oltre questo limite. Questo lavoro tratta della mobilità e della ionizzazione di impatto nel silicio ad alta temperatura. Lo studio è focalizzato sulla determinazione sperimentale di tali parametri e sulla estensione dell'intervallo di temperatura di misura.

Il raggiungimento dei limiti di temperatura che ci si era prefissi, ha richiesto lo sviluppo di architetture e materiali appropriati per il dispositivo, l'uso di nuove soluzioni tecnologiche per il bonding e il packaging e l'ottimizzazione sia delle tecniche che degli strumenti di

misura. L'esplorazione dei limiti fisici connessi alla misura in ambiente ad alta temperatura e del livello di accuratezza delle metodologie proposte per l'estrazione è stata condotta con il supporto di simulazioni bidimensionali e tridimensionali delle funzioni elettriche del dispositivo.

La mobilità è stata misurata con la tecnica di Hall fino a 1000 K grazie all'uso di interconnessioni in Ti/TiN realizzate su resistori van der Pauw senza isolamento a giunzione, i quali risultano per questo immuni da correnti termiche spurie. Un nuovo metodo di estrazione è stato proposto per tenere conto della conduzione ambipolare e in particolare della riduzione della tensione di Hall, causata nel silicio poco drogato dalla conduzione dei portatori minoritari.

I coefficienti di ionizzazione di impatto di elettrone e buca sono stati determinati in funzione del campo elettrico fino a 673 K e 613 K rispettivamente, attraverso misure del fattore di moltiplicazione in transistori bipolari e a induzione statica. La determinazione accurata del coefficiente di impatto di buca ha richiesto lo sviluppo e la validazione di un metodo di estrazione che potesse tenere conto del riscaldamento nella regione di impatto.

I risultati raccolti in questo lavoro rappresentano un esteso set di dati di riferimento, che possono essere utili per la calibrazione di qualsiasi modello compatto per simulazione numerica. In particolare, questi dati sperimentali sono stati usati qui per estendere l'intervallo di validità in temperatura dei modelli sviluppati dall'Università di Bologna. Tali modelli sono stati concepiti in origine appositamente per le simulazioni ad alta temperatura. Alcuni casi di studio sono anche stati discussi con l'obiettivo di mostrare l'accuratezza dei modelli calibrati per le simulazioni di dispositivi in regime di alta temperatura.