

## **Thorsten-Karl-Rudolf Mietzner: Elektronenverteilungen in kurzen n-Kanal Si-MOSFETs unter Berücksichtigung von Elektron-Elektron-Wechselwirkung. 2000**

Der Einfluß von Elektron-Elektron-Wechselwirkung (EE-Wechselwirkung) auf die energetische Elektronenverteilung in kurzen n-Kanal Si-MOSFETs (Silicon-Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) und die sich daraus ergebenden Substrat- und Gate-Ströme sind mit Hilfe des LIMO-Verfahrens (Local Iterative Monte Carlo) untersucht worden. Um die Auswirkungen von EE-Effekten auf die Elektronenverteilung in das LIMO-Verfahren studieren zu können, ist die EE-Wechselwirkung in zwei Anteile zerlegt worden. Auf der einen Seite eine langreichweitige Komponente (PEE-Streuung), die auf der Wechselwirkung eines Elektrons mit kollektiven Anregungen des Elektronengases (Plasmonen) beruht. Dabei kann es zu einem PEE-Emissionsprozeß und einem PEE-Absorptionsprozeß des Elektrons kommen, d. h. das Elektron kann Energie an die Plasmonen abgeben oder von Plasmonen Energie gewinnen. Auf der anderen Seite eine kurzreichweitige Komponente (SEE-Streuung), die die Streuung zweier individueller Elektronen durch Coulomb-Wechselwirkung beschreibt. Da sich die SEE-Streureate durch Integration über die energetische Verteilung der Elektronen ergibt, muß sie während der Simulation selbstkonsistent berechnet werden. Zur Implementierung von SEE-Streuprozessen war es notwendig eine Erweiterung des LIMO-Verfahrens zu entwickeln, die sogenannte direkte Austauschtechnik (DE-Technik, Direct Exchange Technique). Die Berücksichtigung von EE-Streuprozessen bei der Simulation von Elektronenverteilungen in Si-Bulk zeigte, daß bis zu einer Elektronenkonzentration von  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  EE-Wechselwirkung keinen Einfluß auf die Elektronenverteilung hat. Oberhalb einer Elektronenkonzentration von  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  war erkennbar, daß die PEE-Wechselwirkung und die SEE-Wechselwirkung entgegengesetzte Auswirkungen auf die Elektronenverteilungen haben. Während PEE-Streuung der Elektronenverteilung über den gesamten Energiebereich abkühlt, wirkt sich die SEE-Streuung überwiegend nur auf den hochenergetischen Teil der Elektronenverteilung aus und verschiebt diesen zu höheren Energien. Die SEE-Wechselwirkung verschiebt insgesamt die Elektronenverteilung in Richtung einer Fermi-Dirac-Verteilung. Insgesamt dominiert der Einfluß der PEE-Streuung auf die Elektronenverteilungen. Dabei wird die Sättigungsgeschwindigkeit der Elektronen in Silizium bei hohen elektrischen Feldstärken durch EE-Streuprozesse leicht herabgesetzt. Bei der Simulation von kurzen n-Kanal Si-MOSFETs wurde deutlich, daß der Einfluß der EE-Wechselwirkung auf die Elektronenverteilungen innerhalb der MOSFETs mit zunehmender Miniaturisierung der MOSFETs anwächst, da sich kurze MOSFETs durch hohe elektrische Felder und Elektronenkonzentrationen auszeichnen. Im Gegensatz zu den Elektronenverteilungen in Si-Bulk wird der hochenergetische Teil der Elektronenverteilung durch die SEE-Wechselwirkung bestimmt. Dadurch steigt die Anzahl der heißen Elektronen, obwohl die Mehrzahl der Elektronen durch EE-Wechselwirkung aufgrund der Wirkung der PEE-Streuung abgekühlt werden. Heiße Elektronen können innerhalb des MOSFETs durch EE-Streuung mehr Energie gewinnen, als die Energie, die ein Elektron durch ballistischen Transport von Source nach Drain durch die angelegte Potentialdifferenz gewinnen kann. Dabei ist der Einfluß der EE-Wechselwirkung im Übergangsbereich zwischen leitfähigem Kanal und Drain-Kontakt des MOSFETs am größten. Aus den Untersuchungen wurde deutlich, daß die EE-Wechselwirkung eine bedeutende Rolle bei der korrekten Beschreibung des hochenergetischen Teiles der Elektronenverteilung in kurzen Si-MOSFETs spielt. Dadurch werden die Effekte heißer Elektronen in kurzen Si-MOSFETs in entscheidendem Maße durch EE-Wechselwirkung mitbestimmt. Die Auswirkungen der EE-Wechselwirkungen auf die Elektronenverteilungen der MOSFETs haben Konsequenzen für die Substrat- und Gate-Ströme der MOSFETs. Die Substrat-Ströme der untersuchten MOSFETs werden allesamt durch EE-Wechselwirkung leicht abgeschwächt. Der thermisch aktivierte Anteil des Gate-Stromes wird durch EE-Wechselwirkung heraufgesetzt. Dieser Effekt ist vor allem dann stark, wenn der hochenergetische Teil der Elektronenverteilung bei einer Energie von der Größenordnung der  $\text{SiO}_2$ -Potentialbarriere liegt. Die Simulationen haben weiterhin gezeigt, daß der Gate-Strom zukünftiger Generationen von MOSFETs nicht mehr durch den thermisch

aktivierten Anteil des Gate-Stromes bestimmt sein wird, sondern in zunehmenden Maße durch den Anteil des Tunnelstromes kalter Elektronen durch die isolierende SiO<sub>2</sub>-Schicht geprägt sein wird. Da der Tunnelstrom nahezu unabhängig von der EE-Wechselwirkung ist, hat die EE-Wechselwirkung keinen entscheidenden Einfluß auf den Gate-Strom zukünftiger MOSFETs. Bis zum heutigen Tage wird der Gate-Strom als Maß für die Stabilität und die Lebensdauer eines MOSFETs benutzt. Dieser Tatsache liegt die Überlegung zugrunde, daß der Gate-Strom durch heiße Elektronen bestimmt ist. Diese heißen Elektronen können irreversible Schäden am MOSFET verursachen. Da der Gate-Strom in zunehmenden Maß durch das Tunnel kalter Elektronen bestimmt sein wird, muß diese Aussage spezifiziert werden. Es ist nur noch der thermisch aktivierte Anteil des Gate-Stromes, der als Maß für die Lebensdauer eines MOSFETs angesehen werden kann. Aus der Tatsache, daß der thermisch aktivierte Anteil des Gate-Stromes durch EE-Wechselwirkung steigt, ist ersichtlich, daß die Lebensdauer eines MOSFETs durch EE-Wechselwirkung mitbestimmt wird. Die Überprüfung von geometrischen Skalierungsregeln hat gezeigt, daß es bei der EE-Wechselwirkung um einen nichtlinearen Effekt handelt, der mit einfachen Skalierungsregeln nicht zu beschreiben ist. Trotz der Herabsetzung der Betriebsspannungen der MOSFETs, nimmt der Einfluß der EE-Wechselwirkung auf den thermisch aktivierten Gate-Ströme mit abnehmenden Kanallänge der MOSFETs zu. Dies legt den Schluß nahe, daß die EE-Wechselwirkung für zukünftige Generationen von MOSFETs einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Stabilität und die Lebensdauer der MOSFETs haben wird und damit ein begrenzender Faktor für die weitere Miniaturisierung der MOSFETs sein könnte.

---

New generations of field-effect transistors are generally characterized by the presence of high energy electrons that can create serious reliability problems for such devices. Carriers injected into the oxide can get trapped in the oxide or cause interface traps at the oxide interface. High energy electrons also undergo impact ionization, leading to the presence of a substrate current which can trigger parasitic bipolar action. Up to now there are some controversy about the role of electron-electron interaction on the energy distribution of electrons in field-effect transistors. In order to investigate the impact of electron-electron interaction on electron distributions, substrate and gate currents in field-effect transistors a special Monte Carlo technique for the simulation of electron distributions in field-effect transistors has been extended. The limit needed for the statistical error in regions of low carrier density is achieved by an iterative application of classical Monte Carlo steps of test particles that represent the local density. The local iterative procedure treats the charge density, represented by the Monte Carlo electron, with arbitrary weight, independently of the actual number of particles corresponding to a given density. In this way, the computation time is the same for low and high density regions. The electron-electron interaction can be considered by additional scattering rates in the same way as the other scattering processes since the current carrier distribution is always accessible during the simulation. This is not possible in standard Monte Carlo simulations. The electron distribution in silicon bulk and in different short-channel field-effect transistors have been simulated. The results show that most electrons lose energy by electron-electron interaction. Therefore, the substrate current are generally lowered by electron-electron interaction. In contrast to most of the electrons the high energy tail of the electron distribution is increased by electron-electron interaction. This is connected with an increase of the thermionic contribution to the gate current while the gate current due to tunneling of cold electrons through the oxide barrier is nearly unchanged. The gate current has been widely used for predicting device lifetime. The results show that this statement has to be revised for the next generations of nano-sized field-effect transistors. It is only the thermionic part of the gate current that can be used for predicting device lifetime. Since the thermionic contribution of the gate current increases by electron-electron interaction it is concluded that electron-electron interaction has a relevant influence on the reliability of next generations of field-effect transistors.