

***NUMERISCHE BERECHNUNG VON SILIZIUM-GERMANIUM
HETEROSTRUKTUR-BIPOLARTRANSISTOREN***

S. Wagner¹, V. Palankovski², G. Röhrer^{*}, T. Grasser¹, S. Selberherr²

¹ Christian Doppler-Labor für TCAD in der Mikroelektronik am Institut für Mikroelektronik

² Institut für Mikroelektronik, Technische Universität Wien, A-1040 Wien, Gußhausstr. 27-29

^{*} austriamicrosystems AG, Schloss Premstätten, A-8141 Unterpremstätten

ZUSAMMENFASSUNG:

Wir präsentieren Resultate zweidimensionaler numerischer Simulationen von Silizium-Germanium Heterostruktur-Bipolartransistoren (SiGe-HBTs) und vergleichen diese mit entsprechenden Messdaten. Neben den wichtigsten Modellierungsaspekten liegt ein weiterer Schwerpunkt dieses Beitrages auf dem eingesetzten Kleinsignalanalyse-Modus des zweidimensionalen Bauelement- und Schaltungssimulators Minimos-NT. Dem Benutzer stehen eine Reihe spezieller Funktionalitäten zur effektiven und effizienten Ermittlung und Ableitung von Kleinsignal-Kenngrößen zur Verfügung.

EINLEITUNG

Da moderne SiGe-Technologien aufgrund ihrer konkurrenzfähigen Leistung und HF-Eigenschaften in Märkte vordringen, die vorher anderen Materialsystemen vorbehalten waren, gewinnt auch die Kleinsignalanalyse dieser Bauelemente immer mehr an Bedeutung. Der grundsätzliche Gedanke hinter der Kleinsignalanalyse besteht darin, ein Bauelement an einem bestimmten Arbeitspunkt zu linearisieren und die Auswirkungen kleiner sinusförmiger Kontaktströme oder Kontaktspannungen zu analysieren. Der Arbeitspunkt selbst wird mit dem stationären Simulationsmodus errechnet, das qualitativ formulierte Adjektiv „klein“ bezieht sich auf jene maximale Grenze der Amplitude, ab der die auftretenden harmonischen Schwingungen nicht mehr ignoriert werden dürfen.

Streuparameter (S-Parameter) werden vielfach als Unterstützung beim HF-Schaltungsentwurf herangezogen und stellen ein Beispiel für das Resultat der Kleinsignalanalyse dar. Während Admittanzparameter (Y-Parameter) in der Messtechnik den nachteiligen Aspekt des Kurzschlusses der Schaltungen bedingen, den man im HF-Bereich wegen der durch parasitärer Störungen hervorgerufenen Instabilitäten kaum zu gewährleisten vermag, beruht die Messung der S-Parameter auf normalisierten einfallenden und reflektierten Wellen, mit denen die Charakteristik des Zweitorts ermittelt wird.

Die aktuelle Version des zweidimensionalen Bauelemente- und Schaltungssimulators Minimos-NT [1] wurde für die effiziente Berechnung intrinsischer Y- und S-Parameter erweitert. Diese können unter Anwendung von analytischen Standardformeln in andere Parametersätze, zum Beispiel Z- oder H-Parameter, konvertiert werden. Gerade der Parameter h_{21} wird häufig dazu verwendet, die Transitfrequenz f_T zu bestimmen, wie auch in dieser Arbeit gezeigt wird.

MODELLIERUNG

Die in Minimos-NT implementierten physikalischen Modelle erlauben eine fortgeschrittene Simulation von Heterostruktur-Bauelementen. Alle wichtigen physikalischen Effekte, wie zum Beispiel die Veränderung der Bandlücke, die Oberflächenrekombination, transiente Störstellen-Rekombination, Stoßionisation sowie Effekte aufgrund heißer Elektronen und Selbsterwärmung können in den Simulationen berücksichtigt werden. Der Simulator stellt verschiedene komplexe Strukturen und Materialien zur Auswahl, wie zum Beispiel Si, Ge, SiGe, GaAs, AlAs, InAs, GaP, InP, deren Legierungen und, zusätzlich, nichtideale Dielektrika. Die Modelle wurden entweder durch den Vergleich mit experimentellen oder mit Simulationsdaten, welche mit der rigorosen aber weit aufwendigeren Monte Carlo-Methode [3] berechnet wurden, validiert.

Die Modellierung von verspanntem SiGe ist im Besonderen keine einfache Angelegenheit, da die durch den Ge-Anteil stressabhängige Veränderung der Bandlücke korrekt endogenisiert werden muss [2]. Dieser Effekt muss jedoch von der dotierungsabhängigen Veränderung der Bandlücke unterschieden werden, die selbst wiederum von der Materialzusammensetzung des Halbleiters, der Dotierungskonzentration sowie von der Gittertemperatur abhängt [3].

Da für einen Bipolartransistor die Beweglichkeit der Minoritätsladungsträger eine wichtige Rolle spielt, wurde ein analytisches Modell für die Niederfeld-Beweglichkeit entwickelt [3],

das zwischen Majoritäts- und Minoritätsladungsträgern unterscheidet. Es wurden dabei Monte Carlo-Simulationsdaten für Elektronen in Silizium herangezogen.

DER KLEINSIGNALANALYSE-MODUS

Grundsätzlich kann ein Kleinsignalanalyse-Modus auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen, zum Beispiel auf Fourier-Dekomposition, auf quasistationären Modellen, oder unter Einbeziehung von Ersatzschaltbildern. Diese Ansätze ziehen häufig den transienten Simulationsmodus eines Simulators auch für die Kleinsignalanalyse heran. Die Zeitableitungen werden dabei normalerweise mit der Rückwärts-Euler-Methode diskretisiert, weshalb für eine ausreichend gute Genauigkeit sehr viele Zeitschritte notwendig sind. Aus diesem Grund wird der Zeitaufwand durch die Extraktion eines Ersatzschaltbildes anhand der Daten für eine Frequenz reduziert.

Der in Minimos-NT implementierte Kleinsignalanalyse-Modus basiert auf dem sogenannten S^3A -Ansatz [4]. Nach der Berechnung eines vorgegebenen Arbeitspunktes mittels des stationären Simulationsmodi, wechselt der Simulator in den komplexwertigen Simulationsmodus direkt im Frequenzbereich, wo das Bauelement durch eine komplexe sinusförmige Störung mit infinitesimal kleiner Amplitude angeregt wird. Im Vergleich zu transienten Ansätzen ist nicht nur eine Verbesserung hinsichtlich des zeitlichen Simulationsaufwandes zu verzeichnen, sondern zusätzlich auch hinsichtlich der Qualität der Resultate, da keine Diskretisierungsfehler auftreten. Wie in [5] gezeigt, kann der Zeitgewinn im Vergleich zu einem transienten Ansatz bis zu 98% betragen.

In Erweiterung zu der bereits bekannten Kleinsignalanalyse wurde die Extraktion von intrinsischen Y- und S-Parametern implementiert, welche optional durch nachträgliche Einbettung des Bauelements in eine Standardschaltung in extrinsische Parameter konvertiert werden können, um die parasitären Auswirkungen des Messaufbaus zu berücksichtigen.

SIMULATIONSERGEBNISSE

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine $0,4 \times 12\mu\text{m}^2$ SiGe-HBT-Struktur analysiert. Für stationäre Simulationen wird häufig nur der aktive Teil (Basis-Emitter-Bereich, der Kollektorkontakt wurde zum unteren Rand verschoben) berücksichtigt, um bei feineren Gittern nicht allzu lange Simulationszeiten zu bedingen. Aus diesem Grund wurde der

Kollektor-Bereich abgeschnitten und nur die Hälfte der symmetrischen, eigentlichen Struktur simuliert.

Die korrekte stationäre Kalibrierung des Simulators stellt für jede Kleinsignalanalyse eine unabdingbare Voraussetzung dar. Abbildung 1 zeigt einen diesbezüglichen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Vorwärts-Gummelplots bei $V_{CE} = 1,0 \text{ V}$, und Abbildung 2 das Ausgangskennlinienfeld, wobei bei der Simulation einmal die Selbsterwärmung sowie Stoßionisation berücksichtigt wurden und einmal nicht. Der Basisstrom I_B wird dabei von $0,1 \mu\text{A}$ bis $1,7 \mu\text{A}$ um jeweils $0,4 \mu\text{A}$ erhöht.

Im Gegensatz zu den stationären Simulationen ist es bei der Kleinsignalanalyse unerlässlich, die gesamte Bauelementstruktur miteinzubeziehen. Hinsichtlich der oben erwähnten reduzierten Struktur ist festzustellen, dass die wichtigen Kapazitäten zwischen Kollektor und Substrat C_{CS} sowie zwischen Basis und Kollektor C_{BC} nicht richtig wiedergegeben werden konnten. Dieses Problem kann entweder durch eine nachträgliche Berücksichtigung der fehlenden Elemente oder durch eine Bereitstellung einer größeren bzw. eigentlich kompletten Struktur gelöst werden. Der Vorteil der ersten Variante liegt in den kürzeren Simulationszeiten (im Beispiel ungefähr um den Faktor 2,5), der der zweiten Variante in der höheren Genauigkeit durch den Verzicht auf die Approximation.

In den Abbildung 3 und Abbildung 4 werden beiden Varianten für S-Parameter im Frequenzintervall zwischen 50 MHz und 31 GHz bei $V_{CE} = 1,0 \text{ V}$ und Stromdichten von $J_C = 28 \text{ kA/cm}^2$ und $J_C = 76 \text{ kA/cm}^2$ verglichen. Für die erste Variante wurde die Struktur in eine Schaltung mit den folgenden Bauteilen eingebettet: $C_{CS} = 50 \text{ fF}$, $C_{BC} = 20 \text{ fF}$, $R_B = 15 \Omega$ und $R_C = 27 \Omega$. Die Resultate der zweiten Variante sind die vom Simulator ausgegebenen, intrinsischen Parameter.

Die Qualität der simulierten Admittanzparameter kann analytisch kontrolliert werden, da gemäß der Kirchhoff'schen Gesetze die Zeilen- und Spaltensummen der Admittanzmatrix gleich Null sein müssen. Die Simulation lieferte diesbezüglich einen Fehler in der Größenordnung 10^{-16} A/V , während typische Einträge in der Matrix in der Größenordnung von 10^{-3} A/V liegen. Die weitere Transformation in intrinsische S-Parameter beruht wie die Berücksichtigung aller Elemente der Standard-Ersatzschaltung auf analytischen Formeln. Die Ergebnisse können somit direkt mit den gemessenen S-Parametern, die für das untersuchte Bauelement vorliegen, verglichen werden. Da die Messumgebung bereits etwaige parasitäre

Störungen in ihren Ergebnissen mitberücksichtigt, kann auf eine explizite Transformation in extrinsische Parameter verzichtet werden.

Für dasselbe Bauelement wurden die angepasste Verstärkung g_m sowie die Kurzschluss-Stromverstärkung h_{21} berechnet, um die Transitfrequenz f_t und die maximale Oszillationsfrequenz f_{max} extrahieren zu können, die bei den Schnittpunkten der genannten Kurven mit der 0 dB-Linie gefunden werden. Hier zeigt sich der Vorteil der Fortsetzbarkeit der Simulation bis über den Schnittpunkt hinaus, während die Messdaten bei 31 GHz enden und eine Extrapolation (anhand der Steigung von -20 dB bzw. -40 dB) notwendig machen. Die Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen wiederum den Vergleich der simulierten und gemessenen Daten. Es ist zu beachten, dass die maximale Transitfrequenz in Abbildung 5 exakt mit dem korrespondierenden Schnittpunkt in Abbildung 6 übereinstimmt. Abbildung 5 zeigt weiters den Effekt des anisotropen Modells für die Elektronenbeweglichkeit sowie einen Vergleich zu Resultaten der Standardmodelle des kommerziellen Simulators Dessis [6].

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Daten, besonders in Hinblick auf die qualitativen Kurveneigenschaften, zeigen in Kombination mit den Vorteilen bezüglich der Simulationszeit die Effektivität und Effizienz des präsentierten Ansatzes. Zusätzlich kommt deutlich die Notwendigkeit einer umfassenden stationären Kalibrierung des Simulators zum Ausdruck, die eine grundlegende Vorbedingung für den erfolgreichen Einsatz des Kleinsignalanalyse-Modus ist, da im Gegensatz zu den erwähnten Alternativen keine freien Parameter zur Anpassung zur Verfügung stehen. Minimos-NT wurde um zahlreiche Funktionalitäten für die Extraktion verschiedener Sätze von Kleinsignal-Parametern erweitert und steht nach der Kalibrierung für die Optimierung hinsichtlich dieser Größen bereit.

LITERATURANGABE

1. Minimos-NT 2.0 User's Guide, I μ E, Institut für Mikroelektronik, Technische Universität Wien, Austria, <http://www.iue.tuwien.ac.at/software/minimos-nt>
2. Eberhardt J., und Kasper E., „Bandgap Narrowing in Strained SiGe on the Basis of Electrical Measurements on Si/SiGe/Si Hetero Bipolar Transistors,” Materials Science and Engineering, vol. B89, p. 93-96, 2002.
3. Palankovski V, Kaiblinger-Grujin G. Und Selberherr S., „Implications of Dopant-Dependent Low-Field Mobility and Band Gap Narrowing on the Bipolar Device Performance,” J.Phys.IV, vol. 8, p. 91-94, 1998.
4. Laux S., “Techniques for Small-Signal Analysis of Semiconductor Devices”, IEEE Trans.Electron Devices, vol.ED-32, no.10, p.2028-2037, 1986.
5. Wagner S., Palankovski V., Grasser T., Schultheis R., Selberherr S., „Small-Signal Analysis and Direct S-Parameter Extraction“. IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications (EDMO'2002), Manchester, UK, November 18-19, 2002, p. 50-55.
6. ISE Integrated Systems Engineering AG, Zürich, DIOS-ISE, DESSIS-ISE, ISE-TCAD Release 8.0, 2002

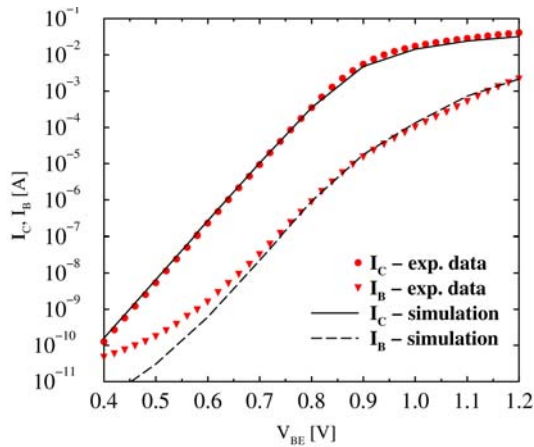


Abbildung 1: Vorwärts-Gummelplots bei $V_{CB} = 0$ V und Raumtemperatur

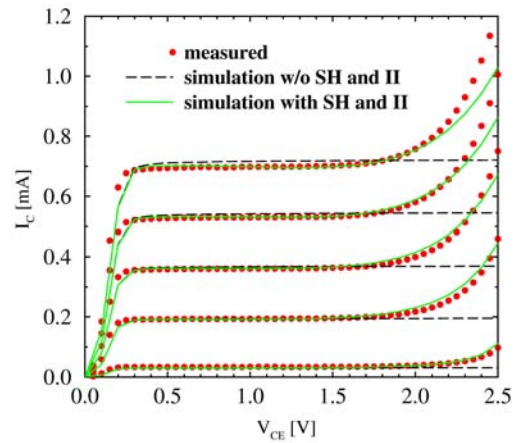


Abbildung 2: Ausgangskennlinienfeld. Die Simulation mit und ohne Selbsterwärmung (SH) sowie Stoßionisation (II).

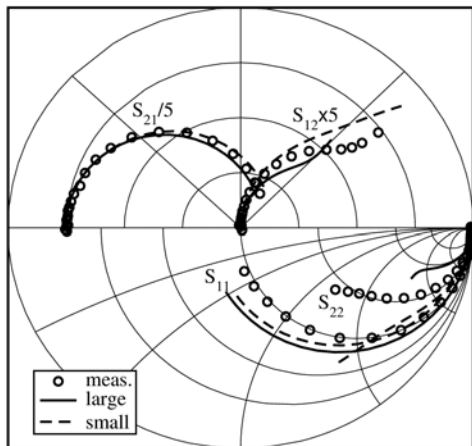


Abbildung 3: S-Parameter bei $J_C = 28$ kA/cm².

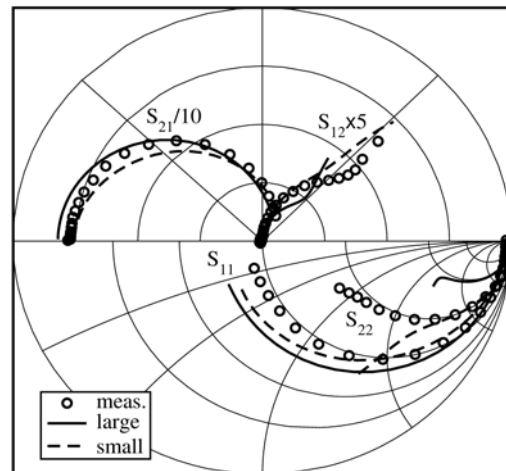


Abbildung 4: S-Parameter bei $J_C = 76$ kA/cm².

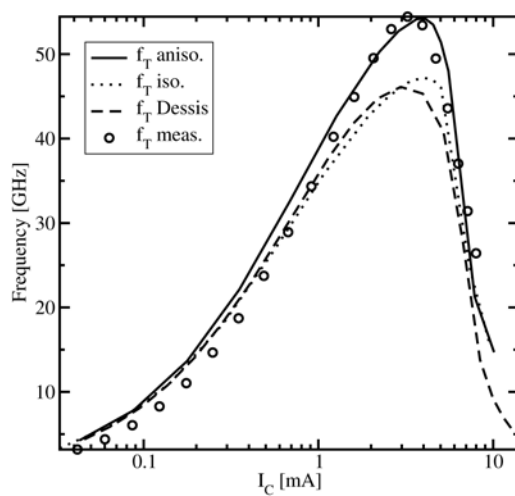


Abbildung 5: Transitfrequenz f_T gegen den Kollektorstrom I_C bei $V_{CE} = 1$ V.

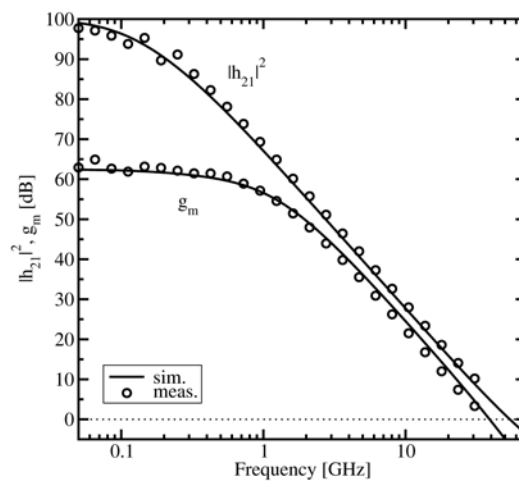


Abbildung 6: h_{21} und g_m gegen die Frequenz bei $V_{CE} = 1$ V und $J_C = 76$ kA/cm².