

Band-Band Tunneldioden auf Silizium/Silizium-Germanium- Basis

Herstellung, Charakterisierung und Aufbau von
Tunneldiodenschaltungen

Von der Fakultät
für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Günter Roland Reitemann
aus Isny im Allgäu

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. E. Kasper
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. N. Frühauf
Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2003

Institut für Halbleitertechnik der Universität Stuttgart
Stuttgart 2003

Berichte aus der Halbleitertechnik

Günter Reitemann

**Band-Band Tunnelioden auf
Silizium / Silizium-Germanium-Basis**

Herstellung, Charakterisierung und Aufbau
von Tunneliodenschaltungen

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2096-8

ISSN 0945-0785

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Für Monika und meine Mutter

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| 1. Zusammenfassung | 1 |
| 2. Einleitung | 9 |
| 3. Halbleitertunneldioden | 11 |
| 3.1 Resonante Tunneldioden | 11 |
| 3.2 Band-Band-Tunneldioden (Esakidioden) | 13 |
| 3.3 Theoretische Grundlagen zum Band-Band-Tunneln | 15 |
| 3.4 Dotierungs- und Energiebandverlauf | 16 |
| 3.5 Simulationen mit BLAZE | 25 |
| 3.6 Berechnung der Peakspannung | 33 |
| 3.7 IU-Ausgangskennlinie | 36 |
| 4. Herstellung der Tunneldioden | 43 |
| 4.1 Wachstum der Schichtstrukturen mittels Molekularstrahl-Epitaxie ... | 43 |
| 4.2 Lithographie | 47 |
| 4.3 Herstellung der Mesa | 51 |
| 4.4 Passivierung mit Siliziumdioxid | 52 |
| 4.5 Ohm'sche Kontakte | 54 |
| 5. DC- und AC-Charakteristik der Esakidioden | 59 |
| 5.1 Bestimmung des negativen differentiellen Leitwertes | 59 |
| 5.2 Krümmungskoeffizient und zweite Ableitung | 62 |
| 5.3 Abschätzung des Serienwiderstandes | 63 |
| 5.4 Untersuchung des Excess-Stroms an pin-Dioden | 68 |
| 5.5 AC-Messungen | 91 |
| 6. Verschiedene Schaltungen mit Tunneldioden | 107 |
| 6.1 Oszillatoren | 107 |
| 6.2 Frequenzverdoppler | 120 |
| 7. Germanium-Inseln auf Siliziumsubstrat: Technologische Vorarbeiten zu Quanteneffekt-Bauelementen | 123 |

IV Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| 8. Ausblick - Outlook | 129 |
| Literaturverzeichnis | 131 |
| A. Anhang - Verschiedenes | 137 |
| A.1 Liste der Veröffentlichungen | 137 |
| A.2 Danksagung | 138 |
| A.3 Lebenslauf | 140 |

Liste der Abkürzungen

| | |
|-----------------|--|
| 2D | 2-dimensional |
| 2DEG | 2-dimensionales Elektronengas |
| 2DHG | 2-dimensionales Löchergas |
| 3D | 3-dimensional |
| A | Vorfaktor, Startpunkt im Leitungsband, Fläche |
| a | Funktion von η |
| \underline{a} | komplexe hinlaufende Welle |
| \AA | Angström (10^{-10} m) |
| a_0 | Gitterkonstante |
| Abb. | Abbildung |
| AC | Wechselstrom |
| ADS | Advanced Design System, Software der Firma HP |
| AFM | Atomic-Force-Microscope (Raster-Kraft-Mikroskop) |
| Ag | Silber |
| A_K | Kontaktfläche |
| Al | Aluminium |
| A_M | Mesafäche |
| A_n | Kontaktabstände |
| As | Arsen |
| Au | Gold |
| B | Vorfaktor, Bor, Trap-Punkt |
| \underline{b} | komplexe rücklaufende Welle |
| BBT | Band zu Band Tunneln |
| β | tunnelbarrierenformabhängiger Vorfaktor |
| BHF | gepufferte Flußsäure |
| B_K | Kontaktbreite |
| BLR | Bandlückenreduktion |
| C | Vorfaktor, Kohlenstoff, Zielpunkt im Valenzband |
| c_1, c_2 | Konstanten von Del Alamo [DeAl86] |
| $CaCO_3$ | Kalziumkarbonat (Kalk) |
| C_e | Kapazität des RC-Blockgliedes zwischen AC zu DC |
| C_n | Konstante |
| CO_2 | Kohlendioxid |

VI 0. Liste der Abkürzungen

| | |
|---------------------|--|
| $CoSi_2$ | Kobalsilizid |
| C_p | Diodenkapazität |
| \tilde{C}_p | flächennormierte Diodenkapazität |
| C'_1, C_1 | parasitäre Kapazität |
| $C_2,$ | parasitäre Kapazität |
| Cr | Chrom |
| CV | Kapazität-Spannungs(-Messung) |
| D | Vorfaktor |
| d | Breite der Energiebarriere, Dicke der epitaktischen Schicht |
| DBPT | Doppelbarrierenpotentialtopf |
| DC | Gleichstrom |
| Δ | Laplaceoperator |
| δ | Delta-Dotierung |
| δ_n | Delta-Dotierung mit Donatoren |
| δ_p | Delta-Dotierung mit Akzeptoren |
| d_i | intrinsische Schichtdicke |
| D_n | Diffusionskonstante Elektronen |
| D_p | Diffusionskonstante Löcher |
| D_S | Schichtdicke |
| DUT | Device under test |
| DWL200 | Laserschreiber der Firma HIMT |
| D_x | Dichte der Zustände bei einer Energie E_x in der Bandlücke |
| D_{x0} | Vorfaktor zu D_x |
| E | Energie |
| \mathcal{E} | elektrisches Feld |
| $\vec{\mathcal{E}}$ | elektrischer Feldvektor |
| E_0 | unterstes Energieniveau im Potentialtopf |
| E_1, E_2 | Energiezustände im Potentialtopf |
| E_{2D} | Energieniveaus im Potentialtopf (2-dimensionales Ladungsträgergas) |
| E_{3D} | Emittierelektronenenergie (3-dimensionales Ladungsträgergas) |
| E_b | Höhe der Energiebarriere |
| E_F | Fermienergie |
| E_{Fn} | Ferminiveau im Leitungsband |
| E_{Fp} | Ferminiveau im Valenzband |
| E_g | Bandlücken-Energie eines Halbleiters |
| E_L | Energie der Leitungsbandkante |
| \mathcal{E}_{max} | maximales elektrisches Feld |
| E_m^n | Energie mit den meisten Elektronenzuständen |
| E_n | Energie eines Subbandes im Potentialtopf, |
| | Differenz zwischen Ferminiveau und Leitungsbandkante |
| $E_{n,b}$ | Differenz zwischen Ferminiveau und |

| | |
|-----------------|---|
| | Leitungsbandkante aus Boltzmannnäherung |
| E_p | Phononenenergie, Differenz zwischen Fermienergie und Valenzbandkante |
| $E_{p,b}$ | Differenz zwischen Fermienergie und Valenzbandkante aus Boltzmannnäherung |
| Epi | Epitaxie |
| ϵ | dielektrische Konstante |
| ϵ_0 | elektrische Feldkonstante |
| ϵ_r | relative dielektrische Konstante |
| η | Integrationskonstante |
| E_{top} | Oberkante des Leitungsbandes |
| E_V | Energie der Valenzbandkante |
| $E(x)$ | Energie im Ortsraum |
| F | Vorfaktor |
| $F_{1/2}$ | Fermiintegral |
| F_L | Fermiverteilung |
| $F_{L,V}$ | Fermiverteilung Leitungs- bzw. Valenzband |
| f_R | Grenzfrequenz des Realteils der Impedanz |
| f_X | Grenzfrequenz des Imaginärteils der Impedanz |
| γ | Krümmungskoeffizient |
| γ_{IE} | Krümmungskoeffizient des Esakistroms |
| γ_{Ix} | Krümmungskoeffizient des Excess-Stroms |
| γ_d | Krümmungskoeffizient des Diffusionsstroms |
| Ge | Germanium |
| g_{min} | minimaler Leitwert |
| G_n | Generationsrate der Elektronen |
| g_n | Kleinsignalleitwert, Leitwert |
| G_p | Generationsrate der Löcher |
| GSG | Ground-Signal-Ground |
| h | Planck'sche Konstante ($6,63 \times 10^{-34} Js$) |
| \underline{H} | komplexe Hybridparameter |
| H_2O | Wasser |
| H_2O_2 | Wasserstoffperoxid |
| H_2SO_4 | Schwefelsäure |
| HBT | Heterobipolartransistor |
| HF | Hochfrequenz, Flußsäure |
| hh | schweren Löcher |
| HL | Halbleiter |
| HNO_3 | Salpetersäure |
| \hbar | reduzierte Planck'sche Konstante ($1,054 \times 10^{-34} Js$) |
| HV | Hochvakuum |
| IHT | Institut für Halbleitertechnik |

VIII 0. Liste der Abkürzungen

| | |
|----------------------------|---|
| i | intrinsisch |
| $I_E, I_{V \rightarrow L}$ | Esakistrom |
| $I_{L \rightarrow V}$ | Zenerstrom |
| I_p | Peakstrom |
| I_{pm} | gemessener Peakstrom |
| I_s | Sättigungsstrom |
| I_T | Gesamtstrom einer Tunneldiode |
| I_{TN} | Nettotunnelstrom |
| I_v | Talstrom |
| I_{vm} | gemessener Talstrom |
| I_x | Excess-Strom |
| j | imaginäre Einheit |
| J_E | Esakistromdichte |
| J_D | Diffusionsstromdichte |
| J_p | Peakstromdichte |
| J_S | Sättigungsstromdichte des Diffusionsstroms |
| J_T | Gesamtstromdichte der Tunneldiode |
| J_{v0} | Excess-Sättigungsstromdichte |
| J_X | Excess-Stromdichte |
| k | Wellenzahl, Boltzmannkonstante |
| \vec{k} | Wellenvektor |
| K1 - K5 | Kreise |
| k_0 | Wellenzahl |
| KEB | Kleinsignalersatzschaltbild |
| k_{max} | Impuls beim Valenzbandmaximum |
| k_{min} | Impuls beim Leitungsbandminimum |
| l | Ausdehnung der Raumladungzone |
| lh | leichten Löcher |
| L_K | Kontaktlänge |
| l_n | Eindringtiefe in das n-Gebiet |
| l_n^* | Schwellwert der Eindringtiefe in das n-Gebiet |
| L_1, L_2 | parasitäre Induktivitäten |
| l_p | Eindringtiefe in das p-Gebiet |
| L_s | Serieninduktivität |
| $L_{s,app}$ | Näherung für die Serieninduktivität |
| L_{s0} | Serieninduktivität des Schaltkreises |
| L_T | Transferlänge |
| L_z | zusätzliche Induktivität |
| m | Masse |
| m_0 | Masse des freien Elektrons ($9,11 \times 10^{-31}$ kg) |
| MBE | Molekularstrahl-Epitaxie(-Anlage) |

| | |
|---------------|--|
| M_c | Anzahl der äquivalenten Minima im Leitungsband |
| m_{de} | Zustandsdichte Masse |
| m^* | effektive Masse |
| m_{hh} | effektive Masse der schweren Löcher |
| ML | Monolage |
| m_l^* | effektive Masse der longitudinalen Elektronen |
| m_{lh} | effektive Masse der leichten Löcher |
| m_{ll} | reduzierte Tunnelmasse longitudinale Elektronen - leichte Löcher |
| m_{lh} | reduzierte Tunnelmasse longitudinale Elektronen - schwere Löcher |
| m_t | reduzierte Tunnelmasse |
| m_t^* | effektive Masse der transversalen Elektronen |
| m_{th} | reduzierte Tunnelmasse transversale Elektronen - schwere Löcher |
| m_{tl} | reduzierte Tunnelmasse transversale Elektronen - leichte Löcher |
| m_n^* | effektive Masse der Elektronen |
| m_p^* | effektive Masse der Löcher |
| μ_n | Beweglichkeit von Elektronen |
| μ_p | Beweglichkeit von Löchern |
| N | Anzahl |
| n | Nummer des Energieniveaus, |
| | Ladungsträgerkonzentration von Elektronen, Idealitätsfaktor |
| n^+ | hohe Ladungsträgerkonzentration von Elektronen |
| N_A | Akzeptorkonzentration |
| N_A^* | Schwellwert der Akzeptorkonzentration |
| ∇ | Nablaoperator |
| N_D | Donatorkonzentration |
| N_D^* | Schwellwert der Donatorkonzentration |
| $n - \delta$ | Flächendotierung mit Donatoren |
| N_{eff} | effektive Dotierung |
| n_{eff} | effektiver Idealitätsfaktor |
| NDR | negativ differentieller Widerstand |
| N_L | effektive Zustandsdichte im Leitungsband |
| $N_{L,BLAZE}$ | Wert der effektiven Zustandsdichte im Leitungsband in BLAZE |
| $N_n, N_n(E)$ | Zustandsdichte des Leitungsbandes |
| n_i | intrinsische Ladungsträgerdichte |
| $N_p, N_p(E)$ | Zustandsdichte des Valenzbandes |
| N_V | effektive Zustandsdichte im Valenzband |
| $N_{V,BLAZE}$ | Wert der effektiven Zustandsdichte im Valenzband in BLAZE |
| O_2 | Sauerstoff |
| ω | Kreisfrequenz |
| ω_R | Kreisgrenzfrequenz des Realteils der Impedanz |
| ω_X | Kreisgrenzfrequenz des Imaginärteils der Impedanz |

X 0. Liste der Abkürzungen

| | |
|-----------------------|--|
| P | Impuls, Phosphor |
| p | Ladungsträgerkonzentration von Löchern |
| p^+ | hohe Ladungsträgerkonzentration von Löchern |
| PCD | Peak-Stromdichte |
| PECVD | Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition |
| $p - \delta$ | Flächendotierung mit Akzeptoren |
| ϕ | elektrisches Spannungspotential |
| $\Psi, \Psi(\vec{r})$ | Wellenfunktion |
| PT | Potentialtopf |
| $PtSi_2$ | Platinsilizid |
| PVCR | Peak- zu Talstrom Verhältnis |
| q | Elektronenladung ($1,6 \times 10^{-19}$) |
| Q1 - Q5 | Quadrate |
| QMS | Quadrupolmassenspektrometer |
| R | Widerstand |
| \vec{r} | Ortsvektor |
| R_1 | parasitärer Widerstand |
| R_2, R'_2 | parasitärer Widerstand |
| R_3, R'_3 | parasitärer Widerstand |
| R_A | Ausbreitungswiderstand im Substrat (spreading resistance) |
| R_c | spezifischer Kontaktwiderstand |
| R_d | Diodenwiderstand |
| R_{DUT} | Widerstand des Meßobjekts (<u>D</u> evice <u>U</u> nder <u>T</u> est) |
| R_E | epitaktischer Widerstand |
| R_e | Widerstand des RC-Blockgliedes zwischen AC und DC |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| RHEED | reflection high energy electron diffraction |
| ρ | Ladungsträgerdichte |
| ρ_E | spezifischer epitaktischer Widerstand |
| ρ_K | spezifischer Kontaktwiderstand |
| ρ_{SH} | spezifischer Schichtwiderstand |
| ρ_{sub} | spezifischer Widerstand des Substrats |
| RIE | reaktives Ionenätzen |
| R_K | Kontaktwiderstand |
| RLZ | Raumladungszone |
| R_{L1}, R_{L2} | Zuleitungswiderstände bei der DC-Meßanordnung |
| R_{m1}, R_{m2} | Meßleitungswiderstände bei der DC-Meßanordnung |
| R_{mm} | Widerstand zwischen Meßspitze und Kontaktmetall |
| $R_{m,n}$ | gemessener Widerstand bei der TLM-Messung mit Index n |
| R_n | Rekombinationsrate der Elektronen, parallel Widerstand der Diode |
| \tilde{R}_n | flächennormierter parallel Widerstand der Diode |

| | |
|----------------------|--|
| $R_{n,max}$ | maximaler parallel Widerstand der Diode |
| R_p | Rekombinationsrate der Löcher |
| R_{peak} | Peak-Widerstand |
| R_s | Serienwiderstand |
| R_{sd} | Serienwiderstand der Diode |
| R_{Sn} | Schichtwiderstand |
| RT | resonantes Tunneln, Raumtemperatur |
| RTD | resonante Tunneldiode |
| R_z | Zusatzwiderstand |
| \underline{S} | komplexe Streuparameter |
| \underline{S}_{11} | komplexer Reflektionsfaktor |
| $S_{1,1}$ | gemessener Reflektionsfaktor |
| $S_{2,2}$ | angefitteter Reflektionsfaktor |
| Sb | Antimon |
| SF_6 | Schwefelhexafluorid |
| Si | Silizium |
| SiGe, $Si_{1-x}Ge_x$ | Silizium-Germanium |
| SiO_2 | Siliziumdioxid |
| T | Temperatur, Tunnelwahrscheinlichkeit |
| t | Zeit |
| T(E) | Transmission |
| τ | Lebensdauer |
| $TiSi_2$ | Titansilizid |
| TLM | Transmission Line Measurement |
| T_{tph} | Phononen unterstützte Tunnelwahrscheinlichkeit |
| T_t | Tunnelwahrscheinlichkeit |
| U | elektrische Spannung |
| U_D | Diffusionsspannung |
| UHV | Ultrahochvakuum |
| $u_k(\vec{r})$ | gitterperiodische Funktion |
| U_{min} | Spannung von g_{min} |
| U_p | Peakspannung |
| $U_{p,appr}$ | Peakspannung - Näherung |
| U_{pm} | gemessene Peakspannung |
| U_T | Thermospannung |
| U_{t0} | Excess-Spannung |
| UV | ultraviolett |
| U_v | Talspannung |
| U_{vm} | gemessene Talspannung |
| U_{x0} | Zustandsdichtespannung |
| $V(\vec{r})$ | potentielle Energie |

XII 0. Liste der Abkürzungen

| | |
|----------------------|--|
| w | Potentialtopfbreite |
| x | Ortskoordinate, Germaniumgehalt |
| x_1, x_2 | klassischer Wendepunkt |
| ξ_n | Hilfsvariable |
| ξ_p | Hilfsvariable |
| y | Ortskoordinate |
| Y | Admittanz |
| \underline{Y} | komplexe Admittanz-Parameter |
| \underline{Y}_{11} | komplexe Admittanz aus \underline{S}_{11} bestimmt |
| Z | Impedanz |
| \underline{Z} | komplexe Impedanz-Parameter |
| Z_0 | Abschlußwiderstand |
| \underline{Z}_{11} | komplexe Impedanz aus \underline{S}_{11} bestimmt |
| z | Ortskoordinate |
| \underline{Z}_D | Eingangsimpedanz |
| $Z_n(E)$ | Anzahl der Zustände im Halbleiter |

1. Zusammenfassung

Inhalt dieser Arbeit ist die Herstellung und Charakterisierung von Esakitunneldioden. Das Wachstum der epitaktischen Schichten erfolgt mittels einer Molekularstrahlepitaxie-Anlage. Es sind diverse Schaltungen mit Tunneldioden aufgebaut und erklärt worden. Für zukünftige Bauelemente werden Ge-Inseln untersucht. Idealerweise wirken diese Inseln als Quantenpunkte. Die Germaniumpunkte wächst man auf vorstrukturierten Silizium-Substraten auf.

Zu Beginn werden die beiden Tunneldiodentypen vorgestellt. Hierbei wird das Funktionsprinzip der resonanten Tunneldioden erklärt. Herzstück dieser Diode ist ein Potentialtopf im Leitungs- oder Valenzband, in den die Ladungsträger hinein- und hinaustunneln können. Bei der Esakidiode hingegen wird die Bandlücke des Halbleiters als Barriere genutzt. Hier können Elektronen vom entarteten n-Gebiet ins p-Gebiet tunneln. Mit Hilfe der Simulationssoftware Blaze der Firma Silvaco sind Energiebanddiagramme, Dotierungsverläufe, elektrische Felder und Tunnelwahrscheinlichkeiten errechnet worden.

Unter Verwendung einer graphischen, bzw. numerischen Lösung kann man die Peakspannung der Tunneldiode unter Angabe der Dotierungen in einer ersten Näherung bestimmen.

Es wird gezeigt, dass die IU-Kennlinie in drei Stromanteile zerlegbar ist:

1. Der Esakistrom, der mit einer halbempirischen Exponential-Formel beschrieben wird.
2. Der Excess-Strom, dessen Gleichung mit Hilfe von Ladungsträgertunneln über Traps beschrieben wird. Hierbei wurde die aus der Literatur stammende Formel mit einer exponentiellen Verteilung der Trapdichte in der Bandlücke modifiziert.
3. Der bekannte Diffusionsstrom eines pn-Übergangs.

Der Serienwiderstand einer Tunneldiode lässt sich mit Hilfe des effektiven Idealitätsfaktors bestimmen. Allerdings muss dabei der Diffusionsast der IU-Kennlinie der Diode deutlich zu erkennen sein.

Durch die Einführung des Krümmungskoeffizienten (zweifache Ableitung der DC-Kennlinie nach der Spannung geteilt durch die erste Ableitung) steht noch ein zusätzliches Mittel für die Analyse des Excess-Stroms zur Verfügung. In diesem Bereich

ist der Krümmungskoeffizient konstant und ist proportional der reziproken Steigung im halblogarithmischen Auftrag des Excess-Stroms über der Spannung.

Mit einem Iterationsverfahren werden die drei Stromanteile an eine gemessene Kurve angefitet. Nach drei Durchläufen liegt der relative Fehler bei 2,3 %. Hierbei ist es möglich, den unerwünschten Excess-Strom zu eliminieren und nur noch den Esaki- mit dem Diffusionsstrom zu überlagern. Das Peak-zu-Tal-Stromverhältnis erhöht sich von ursprünglichen 1,49 auf über 38. Der reziproke Wert des aus der IU-Kennlinie berechneten Krümmungskoeffizienten stimmt in etwa mit dem aus der Iteration erhaltenen Steigung des Excess-Stroms überein.

Unter der Annahme, dass im negativen differentiellen Bereich nur der Esakistrom vorhanden ist, wird der entsprechende negative Leitwert berechnet. Das Maximum des Betrags liegt bei der zweifachen Peakspannung.

Die Wechselstromeigenschaften der Tunneldiode werden mit dem Ersatzschaltbild einer herkömmlichen Diode beschrieben. Einzige Ausnahme ist, dass der parallele Leitwert bzw. Widerstand negative Werte annehmen darf. Bei der komplexen Impedanz treten zwei Grenzfrequenzen auf: zum Einen, wenn der Realteil und zum Anderen, wenn der Imaginärteil verschwindet. Oszillatorbetrieb ist nur möglich, wenn die Grenzfrequenz des Realteils größer als die des Imaginärteils ist. Die Bedingung hierfür lautet, dass die Serieninduktivität größer sein muss als das Produkt aus Serienwiderstand, Diodenkapazität und dem Betrag des negativen differentiellen Widerstandes. Bei Niederfrequenzmessungen (bis 5 MHz) paßt das Ersatzschaltbild sehr gut zu den Meßwerten. Bei verschiedenen Arbeitspunkten wird die Diodenkapazität und der negative differentielle Widerstand bestimmt. Es zeigt sich, dass die Kapazität über der Spannung in etwa konstant bleibt und somit das pin-Dioden-Konzept mit einer konstanten Kapazität funktioniert.

Bei höheren Frequenzen (bis zu 6 GHz) werden Streuparameter gemessen, die anschließend in die Impedanz bzw. Admitanz umgewandelt werden. Die Daten für Open- und Shortstrukturen wurden aufgenommen. Bei einer Spannung von null Volt, sind mittels dieser Daten, durch De-Embedding, die Kapazitäten von unterschiedlich großen Dioden bestimmt worden. Diese Ergebnisse werden dann später für die Oszillatorschaltung verwendet. Für einen Spannungsverlauf wird der Real- und Imaginärteil der Impedanz der gemessenen Diode über der Frequenz aufgetragen. Die Grenzfrequenz des Imaginärteils wird dabei nicht erreicht, die des Realteils hingegen schon. Der Auftrag dieser Grenzfrequenz über der Spannung liefert eine Gerade mit einer Steigung von $-4,4 \text{ GHz/V}$. Eine weitere Analyse dieser Daten erweist sich als äusserst schwierig, da die Diode mit der DC-Quelle schwingt und somit kein stabiler Arbeitspunkt eingestellt werden kann.

Nach den Streuparameteruntersuchungen werden drei Schaltungen mit Tunneldioden vorgestellt:

1. Der Multivibrator wird diskret aufgebaut, er durchläuft stückweise die Kennlinie der Diode. Die Bedingung für den Multivibratormode ist, dass der komplexe

Widerstand der Serieninduktivität größer sein muss als der Imaginärteil der Diodenimpedanz. D.h. beim Einschalten muss die gesamte Spannung zuerst an der Induktivität abfallen. Die Betriebsspannung muss größer als die Peak- aber kleiner als die Talspannung sein. Der reziproke Auftrag der Schwingfrequenz über den dazugeschalteten Serieninduktivitäten zeigt eine Gerade. D.h. es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen der Serieninduktivität und der reziproken Frequenz. Die Kapazität der Diode ist für die eigentliche Schwingung unerheblich.

2. Der harmonische Oszillator wird hier ebenfalls diskret realisiert. Die Serieninduktivität wird klein gehalten, indem man möglichst nahe an die Diode eine parallele Kapazität bringt. Anders betrachtet wird ein AC-Block gegenüber der DC-Quelle eingebracht. Die Spektren der gemessenen Oszillatoren zeigen mindestens eine Oberwelle. D.h. die Dioden haben kein ideales Schwingverhalten. Die Ausgangsleistung der Oszillatoren liegen um ein μW und sind für Lokaloszillatoren von Interesse. Im Zusammenhang dieser Untersuchungen ist es gelungen, die Ursache der Stufen in den IU-Kennlinien im NDR-Bereich zu ermitteln. Es handelt sich hier um Multivibratorschwingungen. Unterdrücken kann man diese, in dem die Diode mit einer parallelen Kapazität (siehe oben) in den harmonischen Oszillatorbetrieb gezwungen wird. Schaltet man zu dem Kondensator einen entsprechenden Widerstand in Serie, so wird die Schwingung gedämpft und die Stufen der DC-Ausgangskennlinie verschwinden.
3. Beim Frequenzverdoppler wird die Krümmung der Kennlinie bei der Peak- oder Talspannung ausgenutzt. Je nach Arbeitspunkt wird die obere Hälfte des Eingangssignals nach unten geklappt oder die untere Hälfte nach oben. Diese Funktion wird an einer Schaltung nachgewiesen. Es konnte eine eingespeiste Frequenz von 700 MHz auf 1400 MHz verdoppelt werden.

Für Quantenpunktbauelemente werden Ge-Inseln auf vorstrukturierten Siliziumsubstraten hergestellt. Die Inseln reihen sich in den geätzten Gräben in zwei Ketten links und rechts an, damit kann besser abgeschätzt werden, wieviele Ge-Inseln innerhalb eines Bauelementes liegen. Die Inseln sind in etwa gleich groß.

Summary

The scope of this work is the production and characterization of Esaki tunneling diodes. The epitaxial layers have been grown by a molecular beam epitaxy machine (MBE). Several circuits with tunneling diodes have been investigated and explained. For future electronic quantum devices the growth of Ge-islands on prepared silicon substrates is demonstrated. The islands should operate ideally as quantum dots.

At the start of this thesis both tunneling diode types are introduced. First the function of the resonant tunneling diode is explained. The most important component of such diodes is a quantum well, either in the valence or conduction band. The charge carriers can tunnel through the well. The Esaki diode uses the bandgap as a tunneling barrier. The electrons can move from the degenerated n- to the p-region. The tunneling probability for several barrier shapes has been calculated. Using the simulation software from Silvaco, energy band diagrams, doping levels, electrical fields, and tunneling probabilities have been determined by the present author.

If the doping levels are known, a graphical or numerical solution to estimate approximately the peak voltage of the IV-characteristic of the diode is given.

The IV-characteristics have been separated into three current contributions:

1. The Esaki current, which is described by a semi-empirical exponential function.
2. The excess current equation is given by charge carrier tunneling through traps in the bandgap. The formula from the literature is modified by an exponential distribution of the trap density.
3. The well-known diffusion current of a pn-junction.

The series resistance of a tunneling diode can be determined by using the effective ideality factor. However the diffusion current contribution of the IV-characteristic of the diode must be clearly visible.

The curvature coefficient (ratio of the second derivative to the first derivative of the IV-characteristics) is an additional tool for analyzing the excess current. In the excess current regime the curvature coefficient is constant and is the reciprocal slope of the semilogarithmic plot of the excess current over the bias voltage.

An iteration has been developed by the author, which fits the three current contributions to measured IV-characteristics. After three runs the error is about 2.3 %.

It is possible to eliminate the excess current contribution and only superimpose the Esaki and diffusion current. In this case the peak to valley ratio has been increased theoretically from 1,49 to over 38. The reciprocal curvature coefficient fits to the excess current slope from the iteration.

For the Esaki current the lowest negative differential conductance appears at the double peak voltage.

The AC behaviour of a tunneling diode is described by the equivalent circuit of a common pn-diode. The only difference is that the parallel conductivity can be negative. There are two cut-off frequencies for the input impedance, one if the real part becomes zero, and one if the imaginary part becomes zero. The device can only oscillate if the cut-off frequency of the imaginary part is smaller than that of the real part. This means the series inductance has to be bigger than the product of series resistance, diode capacitance, and the absolute value of the negative differential resistance. At low frequencies (up to 5 *MHz*) the equivalent circuit fits very well to the measured curves. For several bias points, the diode capacitance and negative differential resistance have been determined. The result of the capacitance shows, that the pin-diode concept with a constant capacitance really works.

At higher frequencies (up to 6 *GHz*) S-Parameter measurements have been made by the author. Afterwards the S-Parameters have been transformed to the impedance, admittance-parameters respectively. The data of open and short structures has also been measured. The capacitance of different sized diodes at zero bias voltage have been extracted, by deembedding, using the data from the open and short measurements. The results have been used later for the oscillator circuit. By using the bias voltage as a parameter the real and imaginary part of the diode impedance are shown over the frequency. The cut-off frequency of the imaginary part is not reached, but the one of the real part. The real part cut-off frequency as a function of the bias voltage displays a linear behaviour with a slope of -4.4 *GHz/V*. The data were not analyzed further, because of the oscillation behaviour of diode with the DC-power supply. Therefore it was not possible to adjust a stable operating point.

Three circuits with tunneling diodes have been introduced, the circuits have been built with discrete elements:

1. The multivibrator runs partly through the IV-characteristics of the tunneling diode. The condition for the multivibrator-mode is, that the complex resistance of the series inductance is higher than the imaginary part of the diode impedance. That means after turning on the battery voltage, the whole voltage is across the inductance. The battery voltage has to be higher than the peak, and lower than the valley voltage. The reciprocal oscillation frequency over the series inductance shows a linear behaviour. The capacitance of the diode is not important for the oscillation.

2. For the harmonic oscillator the series inductance has to be small, this could be realized by placing a parallel capacitance as close as possible to the tunneling diode. In other words an AC-block against the DC-source is fixed into the circuit. The spectra of the oscillators show at least one additional peak. That means the diodes do not oscillate properly. The output power is about $1 \mu\text{W}$ and it is interesting for local oscillators. During these investigations, we found out the reason of the steps from which the IV-characteristics at the NDR range suffers. They are caused by multivibrator oscillation. To suppress the steps, the diode must be forced to an harmonic oscillation with a parallel capacitor as described above. Afterwards these oscillation can be suppressed by an appropriate series resistor to the capacitor.
3. The frequency doubler uses the curvature of the IV-characteristics at the peak or valley bias. It's dependence of the bias voltage if the upper part of the incoming signal is mirrored to the bottom (peak bias) or the bottom part to the top (valley bias). This function has been demonstrated with a tunneling diode circuit. It was also possible to double a frequency of 700 MHz to 1400 MHz .

For quantum dot devices Ge-islands have been grown on a prepared silicon substrate. The islands align in two rows, one on the left and one on the right hand side in the etched trenches. For this condition it is possible to estimate the number of islands in one device. The Ge-islands are almost of the same size.