

Zuverlässigkeitsuntersuchung von GaAs Heteroübergang- Bipolartransistoren

vorgelegt von
Diplom-Physiker
Reza Pazirandeh
aus Teheran/Iran

von der
Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der
Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften
– Dr. rer. nat. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss

Vorsitzender: Prof. Dr. Herbert Reichl
Berichter: Prof. Dr. Günther Tränkle
Berichter: Prof. Dr. Christian Boit

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18.03.2010

Berlin 2010

D 83

Abstract

This work describes the investigation of reliability of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors (HBT) fabricated at the Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin, Germany. Measurement methods and set-ups to determine the reliability of the GaAs HBTs were developed and established. Analytic methods were used to localize and to characterize the degradation mechanisms in these devices. The investigation and measurements were performed close to device development to give feedback on the influence of technology parameter variations on the reliability of the HBTs for further optimization of the devices.

The reliability of the HBTs was determined by stressing the devices at elevated temperature and collector current densities to accelerate the degradation and to obtain life time results within a reasonable time frame. The mean time to failure (MTTF) at “normal” operating conditions was extrapolated from the accelerated data in accordance with the theory of Arrhenius, which describes the temperature dependence of reaction rate. For the degradation mechanisms in HBTs the temperature of importance is the one in the active region of the device, the so called junction temperature. The junction temperature during reliability measurements shall not be too high since unusual degradation mechanisms could be thermally activated. The limit for the junction temperature for the HBTs fabricated at FBH and investigated in this work was determined to be at $T_j = 325\text{ °C}$.

The reliability measurements were all performed on HBTs with one emitter finger with dimensions of $3 \times 30\text{ }\mu\text{m}^2$. The HBTs were biased in common emitter mode and the collector-emitter voltage was always set to 3.0 V. The base current was adjusted to achieve the desired collector current, which requires the monitoring of the collector current during the stress test. This method guaranties a constant collector power dissipation which results in a constant junction temperature. It minimizes the error for determining the MTTF of the HBTs and the activation energy of the degradation mechanisms.

For a quick first data acquisition a so called on-wafer “crash test” was introduced, where HBTs of different wafers were stressed at the same current and junction temperature, thus the life-time results could be directly compared. For this

measurement a wafer prober with special probe needles was set up to test up to five HBTs simultaneously. A “good” device was defined to be one which had a minimum life time of 50 hours at a collector current density of $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ and a junction temperature of $T_J = 300 \text{ }^\circ\text{C}$. This life time could be extrapolated to an aimed life time of $1 \times 10^6 \text{ h}$ at normal operating conditions ($T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$) with an expected activation energy of $E_A = 1 \text{ eV}$.

Wafers with good “crash test” results were chosen for long term reliability tests to determine the MTTF. For this measurement the HBTs were diced and packaged. Devices were stressed at a collector current density of $J_C = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ and in groups at different junction temperatures in specially developed micro-ovens, starting from $250 \text{ }^\circ\text{C}$ in steps of 20-25 K and a maximum junction temperature of $325 \text{ }^\circ\text{C}$.

Increased epitaxial layer quality and the quality of the active layer interfaces led to increased life-time values from 20-40 h for the “crash tests” at the beginning of the development up to 100-300 h for the final generation. At the same time the MTTF of the HBTs increased from $3 \times 10^4 \text{ h}$ up to $1.1 \times 10^7 \text{ h}$, and the activation energy increased from 0.8 eV to 1.1 eV. Similar values were also obtained by other groups, but at much lower current densities. This shows the world class quality of the technology and its reliability without loss of performance. The electrical properties of the HBTs still were very good with a maximum current gain of $\beta_{max} = 110$ and a maximum frequency of $f_{max} \approx 200 \text{ GHz}$, both at $U_{CE} = 3.0 \text{ V}$, and $J_C = 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$.

The degradation mechanisms were investigated on degraded HBTs. First specially designed multi-finger HBTs were stressed and investigated with electroluminescence. Fresh devices emit photons in infra red spectrum and the emitter fingers can be seen as bright stripes. During stressing the devices defects appear in the images as dark lines in the stripes, which are known as dark line defects (DLDs). Further stressing of the devices led to an increase of the number of the DLDs and it could also be observed that some of them grew into neighboring emitter fingers. This process can be explained as follows: recombination in the base leads to emission of photons, but at some existing defects the energy of the non-radiative recombination is emitted as phonons and can lead to creation of more defects or to growth

of existing defects to defect clusters or dislocations and even to gliding of the dislocations. These defects and dislocation act also as recombination centers and amplify this mechanism through a positive feedback. The mechanism is known as recombination enhanced defect reaction - REDR.

The occurrence of REDR can be reduced by reducing the defects in the epitaxial layers in the active region of the HBTs. Due to the existing defects in the substrate and their propagation into the device during the growth of the epi layers, the quality of the substrate material is essential for the reliability. This could be shown by comparing the reliability data of HBTs from substrates with high (LEC) and low (VGF) defect density as well as correlating the reliability data on a LEC wafer with the distribution of the defect density.

The existence and creation of the defects and other degradation mechanisms were investigated on degraded HBTs in transmission electron microscope. Dislocations were observed in the base and collector having their origin in the base-emitter junction. The existence of the dislocation in the collector can be explained by their glide through receiving the energy from recombination at the dislocation. Material analysis with energy dispersive x-ray spectroscopy (EDXS) found diffusion of Indium out of the emitter in degraded HBTs in areas without defects or dislocations. At dislocations and defects the Indium out diffusion was not observed.

Further element analysis with EDXS showed no diffusion of metal into the semiconductor material and also no carbon precipitates were observed, as were reported from other groups. This confirms the stability of the epitaxial materials and the contact metallization.

During this work the development of reliable GaAs based heterojunction bipolar transistors was successfully supported. Setups for on-wafer and long-term reliability measurements were established to determine the median time to failure (MTTF) of the devices. With this setup the superior reliability of GaAs HBTs fabricated at FBH was demonstrated at high current densities. It was shown that the main degradation mechanism in the HBTs is the recombination enhanced defect reaction.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
I. Einleitung.....	7
II. Bestimmung der Zuverlässigkeit von HBTs.....	11
II.1. Zuverlässigkeitsrechnung.....	12
II.1.1. Verteilungsfunktion	12
II.1.2. Zuverlässigkeitsfunktion	12
II.1.3. Dichtefunktion	14
II.1.4. Mittlere Lebensdauer – $MTTF$	14
II.1.5. Ausfallrate.....	14
II.1.6. Weibullverteilung	16
II.2. Lebensdauerbestimmung von HBTs	18
II.2.1. Beschleunigte Alterung.....	18
II.2.1.1. Beschleunigung der Alterung mit Temperatur	19
II.2.1.2. Spannungs- und Strombeschleunigung.....	22
II.2.2. Burn-in	23
III. Der Heteroübergang-Bipolartransistor (HBT).....	25
III.1. Aufbau und Konzept des HBT	26
III.1.1. Funktionsweise des HBT	27
III.2. Herstellung von HBTs.....	30
III.2.1. Epitaxie	30
III.2.2. HBT Herstellungsprozess	34
III.2.3. Mögliche Schwachstellen von HBTs	38
III.3. HBT Eigenschaften	40
III.3.1. DC Eigenschaften	40
IV. Lebensdaueruntersuchungen.....	43
IV.1. Messverfahren	43
IV.1.1. Bestimmung der Junction-Temperatur T_J	44
IV.1.2. Der thermische Widerstand R_{Th}	45
IV.1.2.1. Methode von Bovolon	47
IV.1.2.2. Einfluss von Substratdicke und Luftbrückendicke auf R_{th}	52
IV.1.3. Alterungsbedingungen	54
IV.2. Messtechnik.....	57

IV.3.	Degradationsverlauf	63
IV.3.1.	Kurzzeitdegradation: Burn-in	64
IV.3.1.1.	Elektrische und thermische Einflüsse auf den Burn-in-Verlauf	66
IV.3.1.2.	Burn-in-Prozess in Abhängigkeit der Basisdotierung	69
IV.3.2.	Graduelle und katastrophale Degradation	70
IV.4.	Einfluss der Technologieparameter auf die HBT-Zuverlässigkeit	71
IV.4.1.	Substratmaterial	71
IV.4.2.	Einfluss der Epitaxie auf die Lebensdauer der HBTs	79
IV.5.	Bestimmung der mittleren HBT-Lebensdauer	82
V.	Analytische Untersuchung degradierter HBTs	89
V.1.	Rekombinationsbeschleunigte Defektreaktionen	90
V.2.	Elektrolumineszenz	93
V.3.	Transmissionselektronenmikroskop – TEM	99
V.3.1.	Fokussierte Ionenstrahlen – FIB	100
V.3.2.	TEM-Untersuchung der HBTs	102
V.3.3.	Defekte und Versetzungen	105
V.3.4.	Burgers-Vektor-Analyse	109
V.4.	Materialdiffusion	112
V.4.1.	Energiedispersive Röntgenspektroskopie – EDX	112
V.4.2.	Metalldiffusion in den Halbleiter	112
V.4.3.	Kohlenstoffpräzipitate	114
V.4.4.	Indium-Diffusion aus dem Emitter	116
V.5.	Zusammenfassung der Ergebnisse	118
	Literaturverzeichnis	121
	Danksagung	129

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Zuverlässigkeit von GaAs Heteroübergang-Bipolartransistoren (HBTs), die am Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) hergestellt wurden. Die Lebensdauer der HBTs ist von besonderem Interesse, da sie in Systemen mit hoher Zuverlässigkeit eingesetzt werden. Als Teil eines Systems müssen die einzelnen Komponenten deutlich höhere Zuverlässigkeit aufweisen als das Gesamtsystem, dessen Zuverlässigkeit sich aus den Zuverlässigkeiten der Komponenten zusammensetzt. So liegt zum Beispiel die Anforderung an die Lebensdauer der Bauelemente für Anwendungen in der Raumfahrt bei bis zu 50 Jahren. Dabei wird die Lebensdauer definiert als die Zeit, in der das Bauelement die an ihm geforderten Spezifikationen erfüllt und wird angegeben als die mittlere Lebensdauer ($MTTF^1$). Als Ziel für diese Arbeit wurde eine $MTTF = 1 \times 10^6$ Stunden festgelegt, was ca. 115 Jahren entspricht.

Die Lebensdaueruntersuchungen erfolgten parallel zur Technologieentwicklung. Damit wurde der Einfluss der Variation der Technologieparameter auf die Lebensdauer der HBTs untersucht und der Technologie eine Rückmeldung gegeben. Zusätzlich wurden analytische Untersuchungen an den HBTs durchgeführt, um Schwachstellen und die für Ausfälle verantwortlichen Degradationsmechanismen zu identifizieren und zu charakterisieren.

Für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen wurde ein HBT mit einem Emitterfinger von $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ entworfen, der in allen Layouts integriert und auf allen prozessierten Wafern hergestellt wurde. Für die Alterungsmessungen wurden Messmethoden entwickelt, dazu passende Messplätze entworfen und mit Hilfe von internen und externen Werkstätten aufgebaut. Die Messsoftware wurde entsprechend der Anforderungen der Messmethoden vom Hersteller an die Vorgaben in dieser Arbeit angepasst.

Um die mittlere Lebensdauer $MTTF$ der HBTs in einem angemessenen Zeitraum zu bestimmen, wurde mit beschleunigter Alterung gearbeitet. Als Parameter für die Beschleunigung der Alterung wurden in dieser Arbeit die Umgebungstemperatur und die Kollektorstromdichte eingesetzt. Die Bestimmung der $MTTF$ bei

¹ MTTF: *englisch*, „Mean Time To Failure“

normalen Betriebsbedingungen aus den Lebensdauerdaten der beschleunigten Alterungen erfolgt nach der Gleichung von Arrhenius. Diese Gleichung beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit in chemischen Prozessen von der Temperatur bei bekannter Aktivierungsenergie E_A des Prozesses. Da die Aktivierungsenergie im Allgemeinen nicht bekannt ist, müssen beschleunigte Alterungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden, um sowohl die mittlere Lebensdauer $MTTF$ bei normalen Bedingungen als auch die Aktivierungsenergie E_A des Degradationsmechanismus bestimmen zu können. Die entscheidende Temperatur für die beschleunigte Alterung von HBTs ist die sogenannte Junction-Temperatur T_J , die im aktiven Bereich der HBTs herrscht. Diese Temperatur kann nicht direkt bestimmt werden. Aus elektrischen Messungen bei verschiedenen Temperaturen kann der thermische Widerstand der HBTs bestimmt werden. Mit dem thermischen Widerstand, der Verlustleistung am Arbeitspunkt und der Umgebungstemperatur während der beschleunigten Alterung lässt sich dann die Junction-Temperatur berechnen. Die Extrapolation der $MTTF$ aus beschleunigten Alterungsmessungen erfolgt auf eine Junction-Temperatur von $T_J = 125\text{ °C}$; die üblicherweise bei normalen Betriebsbedingungen im HBT herrscht.

Für die beschleunigte Alterung ist es sehr wichtig, die verwendete Junction-Temperatur, die ein Maß für die Belastung der HBTs während der Alterung ist, nicht zu hoch zu wählen. Eine Junction-Temperatur oberhalb einer kritischen Grenze T_C führt zur Aktivierung von Degradationsmechanismen, die beim Betrieb bei niedrigeren Strömen und Temperaturen nicht auftreten. Die Bestimmung dieser kritischen Temperatur muss für jede Technologie experimentell bestimmen werden. In dieser Arbeit wurde sie für die verwendete Technologie zur Beginn der Entwicklungsphase zu $T_J = 325\text{ °C}$ bestimmt.

Die maximale Stromdichte für die beschleunigten Alterungsmessungen wurde durch einen sogenannten Stufentest – die periodische stufenweise Erhöhung des Stroms bis zum Ausfall des HBT's – bestimmt. Dabei wurde der Maximalwert der Stromdichte auf $J_C = 1 \times 10^5\text{ A/cm}^2$ festgelegt, der ca. 75% der Stromdichte beim Ausfall entspricht. Dies ist eine Standardmethode zur Bestimmung der maximalen Stromdichte für die Alterung von HBTs.

Für diese Arbeit wurden zwei Messmethoden für die Lebensdaueruntersu-

chungen entwickelt: ein Schnelltest zur Erlangung von Lebensdauerdaten in kurzer Zeit zum Vergleich der Wafer, je nach Substratqualität, Epitaxie und Prozess untereinander und ein Test zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$ von aufgebauten Einzeltransistoren. Die Alterungen der HBTs wurden ausschließlich bei konstanter Kollektorverlustleistung durchgeführt. Hierfür wurde eine Kollektorspannung von $U_{CE} = 3,0 \text{ V}$ angelegt, und der Basisstrom während der Alterung so reguliert, dass der gewünschte Kollektorstrom erreicht wurde. Dies garantiert bei konstanter Umgebungstemperatur eine konstante Junction-Temperatur, und somit eine konstante Belastung der HBTs während der Alterung. Dadurch wird die Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$ und der Aktivierungsenergie E_A zuverlässiger.

Für die Schnelltests wurden die HBTs von frisch prozessierten Wafern unter jeweils denselben Bedingungen ($J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $T_J = 300 \text{ °C}$) on-wafer auf einen Prober mit beheizbarem Chuck gealtert. Als gut wurde ein Wafer bezeichnet, wenn die HBTs auf dem Wafer beim Schnelltest mindestens eine Lebensdauer von 50 Stunden aufwiesen. Dies entspricht unter der Annahme, dass die Aktivierungsenergie bei 1 eV liegt, einer mittleren Lebensdauer von ca. 1×10^6 Stunden bei $T_J = 125 \text{ °C}$ – das Ziel dieser Arbeit und der GaAs-HBT-Entwicklung am FBH. Die Aktivierungsenergie wurde durch vorherige $MTTF$ Messungen bestimmt und entspricht bekannten Literaturwerten.

Die Wafer, die bei den Schnelltests besonders gute Ergebnisse lieferten, wurden zersägt und die vereinzelt HBTs aufgebaut. Die aufgebauten HBTs wurden zur Bestimmung der $MTTF$ in speziellen Öfen bei mindestens drei verschiedenen Junction-Temperaturen gealtert. Die $MTTF$ -Bestimmung wurde bei einer Stromdichte von $J_C = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ und einer Junction-Temperatur von maximal $T_J = 325 \text{ °C}$ durchgeführt. Die weiteren Messungen wurden bei niedrigeren Junction-Temperaturen mit jeweils 20 K Unterschied durchgeführt.

Die Ergebnisse der Schnelltests während der Technologieentwicklung haben gezeigt, dass mit der Zeit die Qualität der Epitaxieschichten, insbesondere die Qualität der Grenzflächen zwischen den funktionalen Schichten, und des Prozesses so weit verbessert werden konnten, dass die geforderte Lebensdauer im beschleunigten Alterungstests von 50 Stunden erreicht und übertroffen wird. Auch Messungen der

mittleren Lebensdauer $MTTF$ von aufgebauten HBTs bestätigen diesen Trend. Während die mittlere Lebensdauer von HBTs zu Beginn der Technologieentwicklung bei $3,0 \times 10^4$ Stunden lag, wiesen HBTs der letzten Generation eine mittlere Lebensdauer von etwas mehr als $MTTF = 1,1 \times 10^7$ Stunden auf, das entspricht nahezu zu 1300 Jahren. Dabei stieg die Aktivierungsenergie von $E_A = 0,8$ eV auf $E_A = 1,1$ eV. Ähnliche Ergebnisse ($MTTF = 1 \times 10^7$ h und $E_A = 1,1$ eV) wurden von anderen Gruppen in Forschung und Industrie für ihre am weitesten entwickelte Technologie angegeben. Dies zeigt, dass die Zuverlässigkeit der GaAs HBTs am FBH mit zur Weltspitze gehört.

Die Degradationsmechanismen, die zum Ausfall der HBTs führen, können nur durch analytische Methoden identifiziert werden. Hierfür wurden degradierte HBTs und einige frische HBTs als Referenzproben untersucht, um die Befunde eindeutig dem Alterungsprozess zuordnen zu können. Für die Materialanalytik wurde das Transmissionselektronenmikroskop (TEM¹) mit der energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDXS²) eingesetzt. Elektronenstrahltransparente Proben wurden mit fokussierten Ionenstrahlen (FIB³) präpariert. Die Präparation der Proben ist sehr zeitaufwendig und die Handhabung der extrem kleinen anfälligen Proben, die nur wenige Mikrometer groß und nur 100-300 nm dick sind, ist entsprechend schwierig.

Bei den Untersuchungen der degradierten HBTs im TEM wurde keine Diffusion von Kontaktmetallen am Emitter, an der Basis oder am Kollektor ins Halbleitermaterial und auch keine Elektromigration gefunden. Es wurden keine Kohlenstoffpräzipitate in der Basis der HBTs beobachtet, wie sie von anderen Gruppen in der Nähe der Mesakante gefunden wurden. Die Untersuchungen in TEM zeigten, dass degradierte HBTs Versetzungen aufweisen, die vom Emitter ausgehen und in die Basis reichen, in manchen Fällen sogar bis in den Kollektor. Diese Versetzungen entstehen durch rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR⁴). Bei diesem Degradationsmechanismus führt die durch nichtstrahlende Rekombination freigesetzte Energie zur Entstehung von Punktdefekten, die wiederum als nicht-

¹ TEM: *englisch*, „transmission electron microscope“

² EDXS: *englisch*, „energy dispersive x-ray spectroscopy“

³ FIB: *englisch*, „focused ion beam“

⁴ REDR: *englisch*, „recombination enhanced defect reaction“

strahlende Rekombinationszentren agieren und die Entstehung weiterer Punktdefekte beschleunigen. Das führt zur Ausbildung von Punktdefektclustern und zum Wachstum und zur Ausbreitung von Versetzungen. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Existenz von Versetzungen im GaAs-Substrat Einfluss auf die Lebensdauer der HBTs hat. So haben HBTs aus Waferbereichen mit hoher Versetzungsdichte eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für einen Frühausfall als HBTs von Bereichen mit niedrigerer Versetzungsdichte.

Eine Elementverteilungsanalyse mit EDXS in TEM zeigte, dass sich die Verteilung des Indiums im InGaP-Emitter in versetzungsfreien Bereichen deutlich unterscheidet von der Indiumverteilung in Bereichen mit Versetzungen. In versetzungsarmen Bereichen diffundiert das Indium während der beschleunigten Alterung des HBT's aus dem Emitter, während in versetzungsreichen Bereichen das Indium von Versetzungen an der Ausdiffusion gehindert wird.

Versetzungen werden durch ihren Burgersvektor charakterisiert. Die Bestimmung des Burgersvektors der Versetzungen in degradierten HBTs zu $\vec{b} = \frac{a}{6} [\bar{1}12]$ zeigte, dass diese Versetzungen nicht zu den typischen Versetzungen in GaAs gehören, wie sie zum Beispiel in GaAs-basierten Dioden beobachtet wurden. Die wahrscheinlichsten Burgersvektoren in GaAs sind vom Typ $\frac{a}{2} \langle 110 \rangle$. Die in den gealterten HBTs beobachteten Versetzungen sind Mischtypen und ihr Burgersvektor ist entsprechend zusammengesetzt aus verschiedenen Burgersvektoren, wie zum Beispiel $\frac{a}{2} [011]$ und $\frac{a}{2} [10\bar{1}]$.

Die Untersuchung von degradierenden HBTs mithilfe von Elektrolumineszenz (EL) konnte die Entstehung und Ausbreitung von Versetzungen während des Betriebes sichtbar machen. Bei Rekombination von Ladungsträgern in der Basis kann die freigewordene Energie als Photon emittiert werden. Da die Bandlücke der Basis in GaAs-HBTs im Vergleich zum Emitter und zum Kollektor am geringsten ist, werden die Photonen aus der Basis im Emitter- und Kollektormaterial nicht absorbiert und können mithilfe einer infrarot-sensitiven CCD-Kameras beobachtet werden. Dabei werden die aktiven Bereiche des Transistors als „leuchtende“ Strukturen sichtbar, während die Versetzungen als dunkle Linien (DLD – Dark Line Defects) in diesem hellen Bereich beobachtet werden. Da die HBTs auf der „oberen“ Seite metallisiert sind, mussten die einzelnen HBTs flip-chip– also mit der Me-

tallisierung nach unten – auf spezielle Träger aufgebaut werden. Dieser Aufbau erfordert ein spezielles Layout für die Metallisierung der HBT's. Um die mögliche Ausbreitung der Defekte beobachten zu können, wurden Mehrfinger-HBTs gealtert und untersucht. Während der Alterung der HBTs entstandene DLDs und ihre Ausbreitung durch die Finger des Mehrfinger-HBT's konnten mit Elektrolumineszenz beobachtet werden. Diese Beobachtungen unterstreichen, dass die rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR) der Hauptdegradationsmechanismus in den GaAs-HBTs ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine zuverlässige Methodik und Messtechnik zur Bestimmung der Lebensdauer von HBTs entwickelt und etabliert wurde. Die Entwicklung der GaAs-HBT-Technologie am FBH konnte durch Einsatz der Messtechnik und physikalischen Analysemethoden unterstützt werden, um zuverlässige Bauelemente zu entwickeln, die den Ansprüchen der potenziellen Anwendungen gerecht werden und international konkurrenzfähig sind. Zum ersten Mal wurden Versetzungen in degradierten InGaP/GaAs-HBTs durch Einsatz von FIB und TEM nachgewiesen und mithilfe von EL konnten die Entstehung und Ausbreitung von Versetzungen gezeigt werden. Die rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR) wurde als die Hauptdegradationsmechanismus identifiziert.

I. Einleitung

Die rasche Entwicklung der Halbleitertechnologie hat in den letzten Jahren den Einsatz von Halbleiterbauelementen und -schaltungen in diversen Anwendungen beschleunigt. Die Entwicklung der elektronischen Bauelementetechnologie setzt auf immer kleinere Strukturen ($< 100\text{ nm}$), insbesondere für Hochfrequenzanwendungen ($1 - 100\text{ GHz}$), zum Beispiel für das Abstandsradar in Fahrzeugen bei 77 GHz und auch für Anwendungen, die hohe Signalleistungen ($> 50\text{ W}$) benötigen, wie zum Beispiel in der Mobilfunktechnologie, wo für Basisstationen Verstärker mit Ausgangsleistungen bis 120 W eingesetzt werden. Diese Entwicklung ist auch eine Herausforderung an die Zuverlässigkeit der Bauelemente, da die kleineren Strukturen anfälliger gegenüber thermischen, mechanischen und elektrischen Belastungen sind.

In dieser Arbeit wird die Zuverlässigkeit von Halbleitertransistoren – in diesem Fall Heteroübergang-Bipolartransistoren (HBT) – untersucht, die am Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin hergestellt werden. Die Technologie am FBH basiert auf III-V-Verbindungshalbleitern, einer Verbindung von dreiwertigen und fünfwertigen Elementen; hier wird die Verbindung aus Gallium (Ga) und Arsen (As), Galliumarsenid (GaAs), verwendet.

Bauteile aus GaAs schalten zwar nicht schneller als ihre vergleichbaren Pendants aus Silizium, erzeugen jedoch weniger Signalrauschen bei hohen Frequenzen und können wegen der hohen Durchbruchspannung – aufgrund der größeren Bandlücke – bei höheren Leistungen betrieben werden. Daher gilt GaAs als wichtiger Grundstoff für die Mobilfunk- und Satellitentechnologie sowie für Radarsysteme. In Mobiltelefonen werden GaAs-Leistungsverstärker ($\sim 1\text{ W}$) eingesetzt. Darüber hinaus wird GaAs als Ausgangsmaterial benutzt, um Laserdioden bzw. oberflächenemittierenden Lasern (VCSEL¹) herzustellen, sowie Satelliten mit Energie aus hoch spezialisierten Solarzellen zu versorgen.

Die hier untersuchten HBTs werden in Schaltungen für diverse Hochfrequenzanwendungen verwendet. Sie müssen einerseits hohe Leistungen bis 15 W bei 2 GHz liefern, andererseits aber auch zuverlässig und langlebig sein. Dazu ist die

¹ VCSEL: *englisch*: „Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser“

Auswirkung der verwendeten Technologie auf die Zuverlässigkeit der HBTs untersucht und entsprechendes Feedback zur Technologieentwicklung gegeben worden. Zum Vergleich der Zuverlässigkeit mit Technologien anderer Hersteller wurde die mittlere Lebensdauer $MTTF$ ¹ durch beschleunigtes Altern bestimmt. Dabei wurden die Transistoren bei erhöhter Stromdichte und Umgebungstemperatur betrieben. So kann aus Lebensdauerergebnissen bei hohen Belastungen nach Arrhenius auf die Lebensdauer bei „normalen“ Bedingungen extrapoliert werden [Arrh89]. Hierfür müssen entsprechend des Anwendungsgebiets der Transistoren die Parameter für die Lebensdaueruntersuchung festgelegt werden. Die Transistoren wurden sowohl on-Wafer gemessen, als auch einzeln aufgebaut gealtert.

Für die Zuverlässigkeit spielen sowohl technologische Prozesse zur Herstellung der Bipolartransistoren eine Rolle als auch die nachfolgenden Prozesse, die für das Einhäusen der Transistoren benötigt werden. Die Herstellungstechnologie kann man in zwei Bereiche einteilen: die Material- und die Prozesstechnologie. Die Materialtechnologie umfasst die Herstellung und Charakterisierung der für das Bauelement notwendigen vertikalen Schichtstruktur, die epitaktisch auf GaAs-Substraten abgeschieden wird. Hier spielen Substratmaterial, Qualität der Schichten, Schichtfolge, Schichtdicke und Dotierungshöhe eine Rolle für die Zuverlässigkeit. Um nun die Einflüsse einzelner Parameter, wie zum Beispiel Substratmaterial oder Basisdotierung, auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Transistoren zu bestimmen, wurden die Wafer mit wenigen Parametervariationen beim Prozess versehen und die Auswirkungen untersucht. Die nachfolgende Aufbautechnik besteht aus diversen Schritten, in denen die prozessierten Wafer mechanisch abgedünnt und gesägt werden. Danach werden die vereinzelt Transistoren in Gehäuse gelötet oder geklebt und gebondet.

Weiterhin werden die Mechanismen untersucht, die zur Degradation der Transistoren führen. Um diese Mechanismen zu identifizieren, wurden folgende analytische Methoden angewendet:

- Elektrolumineszenz, EL
- Rasterelektronenmikroskopie, REM

¹ $MTTF$: *englisch*, „Mean Time To Failure“

- Fokussiertes Ionenstrahlätzen, FIB¹
- Transmissionselektronenmikroskopie, TEM
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie, EDXS²

Hierbei werden auch aus der Literatur bekannte Mechanismen diskutiert, wie zum Beispiel die Rolle von Versetzungen in degradierten Transistoren [Hend96], aber auch der Vergleich mit der Degradation von Laserdioden wird hinzugezogen, um die Physik der Defektentstehung besser verstehen zu können.

Zusammenfassend ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung von zuverlässigen Transistoren, die eine mittlere Lebensdauer von mindestens 5×10^6 Stunden aufweisen, die auf dem Markt konkurrenzfähig ist. Zur Ermittlung der Lebensdauer wurden entsprechende Messplätze aufgebaut und Messverfahren entwickelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen ein in die Optimierung der Technologie. Gleichzeitig wurden die physikalischen Mechanismen identifiziert, die zur Degradation der Transistoren führen.

Diese Arbeit ist folgendermaßen gegliedert: Nach der Einleitung werden im zweiten Kapitel zunächst die Grundlagen der Zuverlässigkeitsrechnung kurz vorgestellt, und Methoden zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer *MTTF* erläutert. Im dritten Kapitel werden Aufbau und Funktionsweise von HBTs erläutert. Anschließend wird der Herstellungsprozess der HBTs bzw. die Technologie am Ferdinand-Braun-Institut beschrieben. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit Lebensdaueruntersuchung von GaAs HBTs. Zunächst werden Messverfahren und Messtechnik vorgestellt und die Bestimmung der verschiedenen wichtigen Parameter erläutert. Anschließend werden die Degradationsmechanismen in GaAs HBTs untersucht. Anschließend werden die verschiedenen Stadien der Transistordegradation beschrieben und ein Bezug zur Technologie hergestellt. Dabei werden die Einflüsse von Technologieparametern – Epitaxie (Substratmaterial und Basisdotierungshöhe), Prozessierung – auf die Zuverlässigkeit der HBTs untersucht. Im fünften Kapitel werden die analytischen Ergebnisse vorgestellt und die daraus gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

¹ FIB: *englisch*, „Focused Ion Beam“

² EDXS: *englisch*, „Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy“

II. Bestimmung der Zuverlässigkeit von HBTs

Die Zuverlässigkeit von Halbleiterbauelementen hat in den letzten Jahren durch den wachsenden Einsatz, insbesondere für Luft- und Weltraumanwendungen und in der Automobilindustrie, enorm an Bedeutung gewonnen. Sie hängt von vielen Parametern ab, insbesondere von der Herstellungstechnologie und von den Betriebsbedingungen. Zuverlässigkeit wird definiert als *die Wahrscheinlichkeit, dass ein System mit definierten Eigenschaften unter definierten Bedingungen in einer bestimmten Zeitspanne fehlerfrei arbeitet* [Ieee90]. Die Zuverlässigkeitsanalyse ist interdisziplinär und setzt Kenntnisse aus verschiedenen Bereichen voraus, wie Bauelementephysik, Simulation, Messtechnik, Bauelemente- und Defektanalyse.

Die Zuverlässigkeit von Halbleiterbauelementen wird durch ihre Lebensdauer, eine stetige Zufallsgröße $T \geq 0$, charakterisiert. Sie wird definiert als die Zeit, in der das Bauelement nach Definition funktioniert, bzw. noch nicht ausgefallen ist und wird über die Ausfallstatistik bei definierten Alterungs- und Ausfallbedingungen ermittelt. Um Ergebnisse in einem angemessenen Zeitraum zu erhalten, werden beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen bei erhöhter Umgebungstemperatur durchgeführt und deren Ergebnisse auf normale Bedingungen extrapoliert. Dieses Verfahren wird in der gesamten Halbleiterindustrie zur Lebensdauerbestimmung eingesetzt [Hobb00].

Die Anforderungen an die Halbleiterbauelemente bezüglich ihrer Lebensdauer sind sehr hart, denn diese Bauelemente werden in Systeme eingesetzt, deren Gesamtlebensdauer abhängig vom Einsatz bis zu 50 Jahren (in der Raumfahrt) sein muss. Somit muss jedes Element des Systems eine deutlich höhere Zuverlässigkeit aufweisen.

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen erläutert. Zu Beginn werden die wichtigsten Begriffe definiert und danach die Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer durch beschleunigte Alterung und Berechnung der Aktivierungsenergie der Degradationsmechanismen aus den Lebensdauerdaten vorgestellt.

II.1. Zuverlässigkeitsrechnung

Aufgabe der Zuverlässigkeitsrechnung ist es, Aussagen über die Lebensdauer oder Funktionsdauer von bestimmten Betrachtungseinheiten – hier von GaAs HBTs – zu treffen. Um die Zuverlässigkeit mathematisch zu beschreiben, werden Werkzeuge und Methoden der Statistik verwendet. Die Lebensdauer T besitzt eine zugehörige Lebensdauerverteilung, die durch die *Verteilungsfunktion* $F(t)$, durch die *Zuverlässigkeitsfunktion* $R(t)$ und durch die *Dichtefunktion* $f(t)$ beschrieben wird.

II.1.1. Verteilungsfunktion

Die Verteilungsfunktion $F(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die betrachtete Einheit im Zeitraum von 0 bis t ausfällt. Sie bestimmt damit die Lebensdauer- oder Ausfallverteilung bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauelements. Die Verteilungsfunktion $F(t)$ besitzt einen Wertebereich zwischen 0 und 1. Zum Zeitpunkt $t = 0$ beträgt die Ausfallwahrscheinlichkeit 0. Die Funktion $F(t)$ ist monoton steigend, das heißt, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit mit der Zeit steigt und sich der 1 nähert (Abbildung 1):

$$0 \leq F(t_1) \leq F(t_2), \text{ für } 0 \leq t_1 \leq t_2, \text{ mit } \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1.$$

II.1.2. Zuverlässigkeitsfunktion

Die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ (*Reliability*) gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass im Zeitintervall $[0, t]$ kein Ausfall erfolgt, daher wird sie auch als Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet:

$$R(t) = \frac{\text{Anzahl funktionierender Bauelemente zur Zeit } t}{\text{Gesamtzahl der Bauelemente bei } t = 0}$$

$R(t)$ ist direkt abhängig von $F(t)$: $R(t) = 1 - F(t)$. Entsprechend besitzt diese Funktion einen Wertebereich zwischen 0 und 1 und ist monoton fallend. Zum Zeitpunkt $t = 0$ besitzt $R(t)$ den Wert 1, die Einheit ist also intakt (Abbildung 1). Die Überlebenswahrscheinlichkeit fällt mit der Zeit, sodass die Einheit mit der Zeit ausfällt:

$$R(t_1) \leq R(t_2) \leq 1, \text{ für } 0 \leq t_1 \leq t_2, \text{ mit } \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0.$$

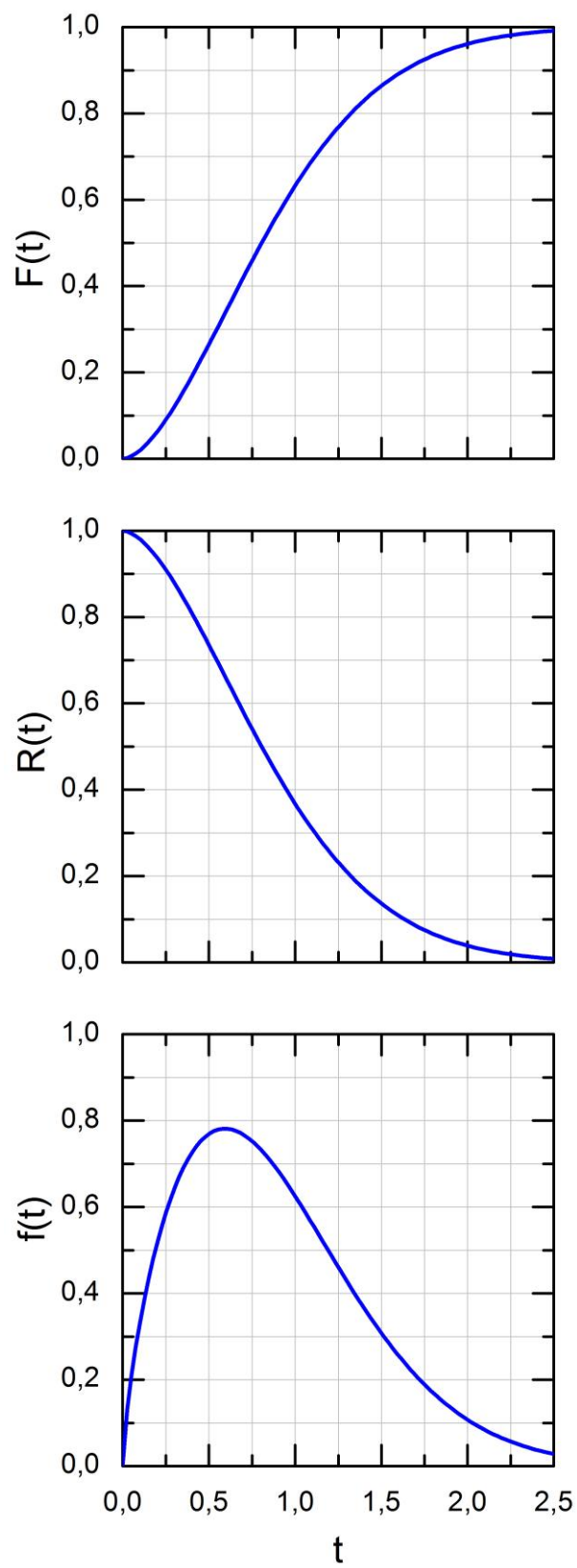


Abbildung 1: Verteilungsfunktion $F(t)$, Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ und Dichtefunktion $f(t)$.

II.1.3. Dichtefunktion

Die Ableitung der Verteilungsfunktion $F(t)$ – für den Fall, dass sie stetig ist – bezeichnet man als *Ausfall- oder Lebensdauerdichte* (Abbildung 1):

$$f(t) = F'(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Für beliebig kleine Zeiträume $\Delta t \rightarrow 0$ ergibt das Produkt $f(t) \cdot \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ an, also die Wahrscheinlichkeit, dass die Komponente in diesem Zeitintervall ausfällt:

$$F(t + \Delta t) - F(t) = \int_t^{t+\Delta t} f(x)dx \approx f(t) \cdot \Delta t$$

II.1.4. Mittlere Lebensdauer – *MTTF*

Ein Maß für die Zuverlässigkeit eines Systems oder einer Komponente ist die mittlere Lebensdauer *MTTF*:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Sie ist der Mittelwert der Zeitspanne von Beanspruchungsbeginn bis zum Ausfall der untersuchten Einheiten, deren Zuverlässigkeit durch die Funktion $R(t)$ repräsentiert wird. Die mittlere Lebensdauer *MTTF* ist die wichtigste Größe der Zuverlässigkeitsuntersuchungen.

II.1.5. Ausfallrate

Die Ausfallrate $h(t)$ (*hazard rate*) stellt ein Maß für das bedingte Ausfallverhalten einer Betrachtungseinheit dar, die zum Zeitpunkt t funktioniert. Die Ausfallrate kann definiert werden als die Ausfallwahrscheinlichkeit für ein funktionierendes Bauelement im Zeitintervall $[t; t + dt]$. Es gilt:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} \quad (9)$$

Der Zusammenhang zwischen Verteilungsfunktion und Ausfallrate ergibt sich durch Integration auf beiden Seiten der Gleichung (9) und Entlogarithmieren. Dann erhält man für die Ausfallwahrscheinlichkeit die Darstellung:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t h(x)dx}$$

In speziellen Fällen mit konstanter Ausfallrate, $h(t) = \lambda$, erhält man für die Lebensdauerverteilung eine Exponentialverteilung:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Diese Verteilung ist gut bekannt, z. B. beschreibt sie in der Physik den radioaktiven Zerfall.

Die Ausfallrate von Halbleiterbauelementen ist jedoch nicht konstant, sondern variiert mit der Zeit. Der Verlauf der Ausfallrate lässt sich zeitlich einteilen in drei Bereiche (Abbildung 2):

- **Frühausfälle:** Bei den Frühausfällen handelt es sich um Bauelemente, die aufgrund von Montage-, Fertigungs- oder Werkstofffehlern frühzeitig ausfallen. Daher ist dieser Bereich sehr wichtig bei der Entwicklung von neuen Bauelementen und Technologien. Die Ausfallrate sinkt jedoch schnell mit der Zeit und nähert sich einer konstanten Ausfallrate.
- **Zufallsausfälle:** Dieser Bereich wird charakterisiert durch eine konstante – meist niedrige – Ausfallrate. Die Ausfälle treten zufällig auf – dies ist der Bereich der „normalen“ Lebensdauer der Bauelemente.
- **Verschleiß- bzw. Ermüdungsausfälle:** Der letzte Bereich ist durch steigende Ausfallrate gekennzeichnet. Dieser Anstieg kommt durch Abnutzung zustande.

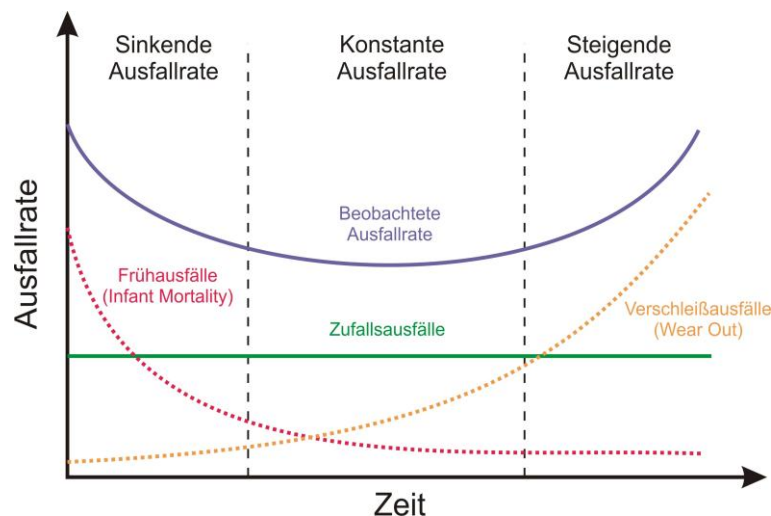


Abbildung 2: Badewannenkurve. Die beobachtete Ausfallrate setzt sich zusammen aus den drei Komponenten: Frühausfälle, Zufallsausfälle und Verschleißausfälle.

Der Gesamtverlauf der Ausfallrate mit der Zeit hat eine charakteristische Form und wird daher die „Badewannenkurve“ genannt. Dieser Verlauf kann jedoch nicht von einer einzigen Lebensdauerverteilung beschrieben werden. Üblicherweise wird deshalb meist jeder Bereich für sich durch eine gesonderte Verteilung beschrieben.

II.1.6. Weibullverteilung

Die Weibullverteilung ist eine statistische Verteilung, die zur Untersuchung von Lebensdauern von Halbleiterbauelementen verwendet wird. Sie wird häufig zur Beschreibung von Lebensdauerverteilungen mit Abnutzungserscheinungen verwendet [Amer87].

Die Weibullverteilung wird wie folgt dargestellt:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad \text{für } t > 0, \alpha > 0, \beta > 0.$$

Entsprechend ist die Dichtefunktion der Weibullverteilung:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}$$

und die Ausfallrate:

$$h(t) = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1}$$

Dabei sind α Formparameter und β Skalenparameter. Die Einflüsse der beiden Parameter auf die Dichtefunktion sind in Abbildung 3 dargestellt.

Der große Vorteil der Weibullverteilung ist ihre Flexibilität, so lassen sich mit ihr steigende ($\alpha > 1$), konstante ($\alpha = 1$) und fallende ($\alpha < 1$) Ausfallraten beschreiben (Abbildung 3, unten). Das ist insbesondere von Interesse für Ausfallraten, deren zeitlicher Verlauf der Badewannenkurve (Abbildung 2) entspricht.

Verschiedene weitverbreitete Verteilungen sind Sonderfälle der Weibullverteilung für bestimmte Parameter. Zum Beispiel entspricht die Exponentialverteilung der Weibullverteilung für $\alpha = 1$, und für $\alpha = 3,4$ entspricht sie der Normalverteilung.

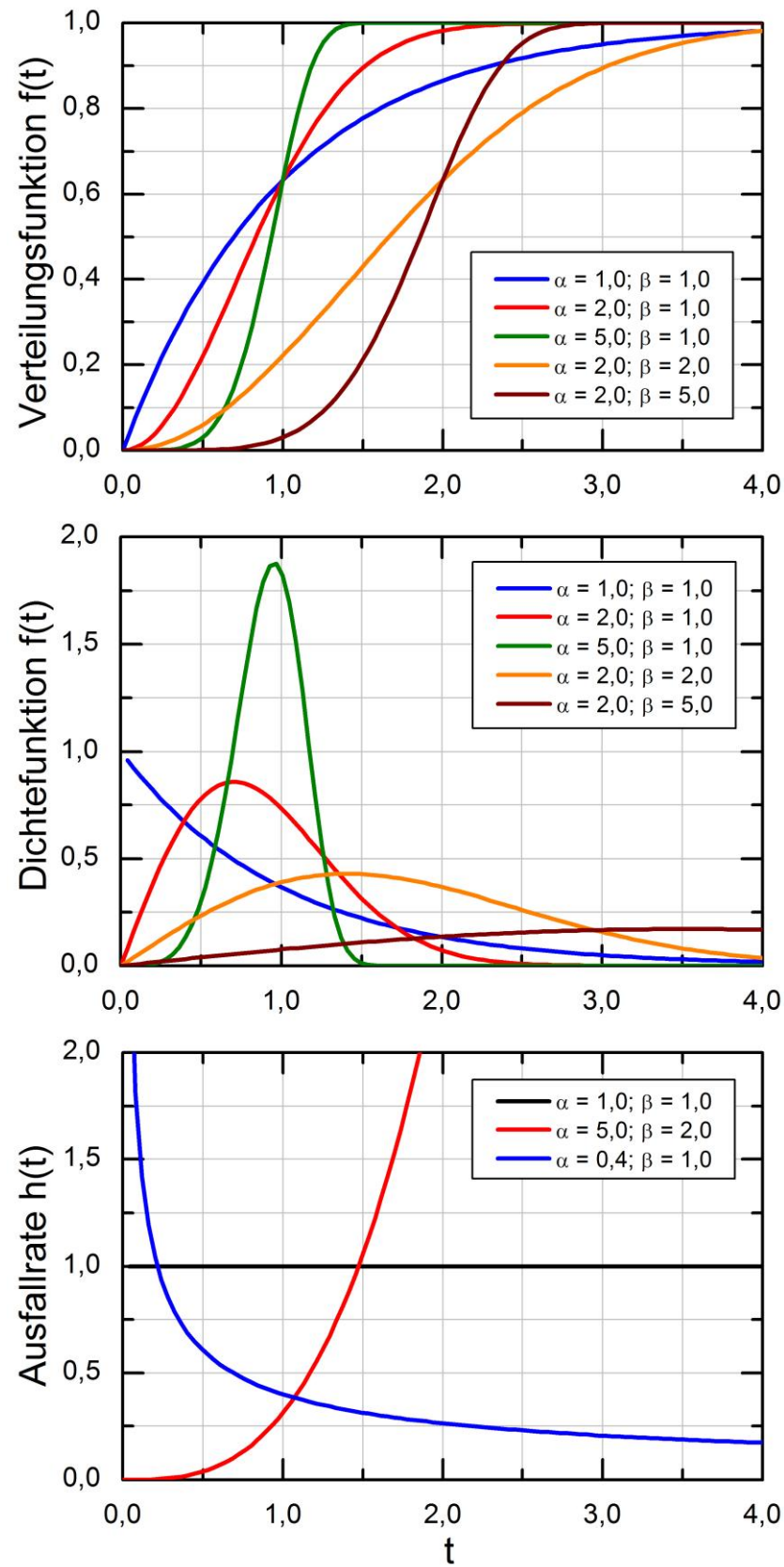


Abbildung 3: Verteilungsfunktion (oben), Dichtefunktion (mitte) und Ausfallrat (unten) der Weibullverteilung für verschiedene Parameter.

II.2. Lebensdauerbestimmung von HBTs

Die Lebensdauer von HBTs soll unter Betriebsbedingungen einige Hunderttausend Stunden betragen, sodass ihre Bestimmung nicht direkt erfolgen kann. Daher wurden – abhängig vom Einsatz der HBTs – mehrere Methoden entwickelt, um die Alterung der Bauelemente zu beschleunigen und so deren Lebensdauer schneller bestimmen bzw. abzuschätzen zu können.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, aus historischen Daten die Lebensdauer der Bauelemente abzuschätzen. Einige Hersteller verwenden den MIL-HDBK-217 Standard [MIL217] oder eine darauf aufbauende Prozedur. Dabei handelt es sich um ein Handbuch, das eine Reihe von empirisch entwickelten Modellen für Ausfallraten beinhaltet. Diese basieren auf historischen Bauelemente-Ausfallraten für eine breite Palette von Bauteiltypen. Der MIL-HDBK-217-Standard wurde viele Jahre für Zuverlässigkeitsvorhersagen eingesetzt, aber seit 1995 wurde das Handbuch nicht mehr aktualisiert. Die jeweiligen Hersteller haben das Handbuch für ihre eigenen Anwendungen weiter entwickelt.

In den letzten Jahren werden bei Halbleiterherstellern immer mehr beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen als effektive Methoden anerkannt, um die Zuverlässigkeit von Bauelementen zu untersuchen [Hobb00]. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter für das beschleunigte Altern vorgestellt und diskutiert.

II.2.1. Beschleunigte Alterung

Es gibt diverse Parameter, die eingesetzt werden können, um die Alterung der Bauelemente zu beschleunigen. Der Einsatz der jeweiligen Parameter hängt vom Einsatz und Aufbau des Bauelements ab. Eingesetzt werden: Temperatur, Spannung, Strom, Luftfeuchtigkeit und Temperaturschwankungen, Vibration, Schock, elektromagnetische Strahlung und Felder, Teilchenstrahlung, Druck und sogar Staub oder Sand. Kombinationen von diesen Stressbedingungen werden eingesetzt, um spezielle Umgebungen zu simulieren.

Die Parameter zur Beschleunigung der Alterung sollten jedoch vor dem Einsatz gut abgeschätzt und in Abhängigkeit von den zur erwartenden Degradationsmechanismen eingesetzt werden. Auch über den Einfluss der Beschleunigungsparameter auf die Degradationsmechanismen und auf die elektrischen Parameter der

Bauelemente sollte Gewissheit herrschen. Durch den Einsatz der erhöhten Parameter zur Beschleunigung der Alterung können zusätzlich Ausfallmechanismen aktiviert und beschleunigt werden können als unter normalen Betriebsbedingungen. Dadurch können sowohl die falschen Mechanismen beobachtet und für die Degradation der HBTs verantwortlich gemacht, als auch die Lebensdauer der Bauelemente dadurch falsch eingeschätzt werden.

II.2.1.1. Beschleunigung der Alterung mit Temperatur

Die Erhöhung der Umgebungstemperatur T_A ist ein weitverbreitet eingesetzter Parameter zur Beschleunigung der Alterung. Damit werden die chemischen und physikalischen Prozesse im Bauelement und somit auch die Degradationsmechanismen beschleunigt und die Lebensdauertests können in kürzerer Zeit durchgeführt werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit r für die Degradationsmechanismen wird durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben:

$$r = C e^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (10)$$

Dabei sind

- r : Reaktionsgeschwindigkeit,
- C : Proportionalitätsfaktor,
- E_A : Aktivierungsenergie in eV,
- k : Boltzmann-Konstante, $8,6 \times 10^{-5}$ eV/K,
- T : Temperatur in der aktiven Schicht in Kelvin.

Die Arrhenius-Gleichung wurde ursprünglich entwickelt, um die quantitative Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur in diffusionskontrollierten chemischen Prozessen zu beschreiben [Arrh89]. Galwey und Brown zeigten, dass die Arrhenius-Gleichung zur Beschreibung der Kinetik von Prozessen in Halbleitern verwendet werden kann [Galw95].

Bei Lebensdaueruntersuchungen fällt das Bauelement aus, wenn ein Parameter einen definierten Grenzwert über- oder unterschreitet. Bei HBTs wird eine Verringerung von 20 bis 50 % der Stromverstärkung β gegenüber ihrem Wert bezogen auf den Zeitpunkt $t = 0$ als Ausfallbedingung definiert. In dieser Arbeit wird eine Verringerung von 20 % der Stromverstärkung β nach Erreichen eines stabilen Wertes als Ausfall definiert.

In Abbildung 4 ist der Verlauf der Stromverstärkung β von HBTs mit der Zeit bei verschiedenen Umgebungstemperaturen T_A dargestellt. Man erkennt, dass mit steigender Umgebungstemperatur T_A ($T_{A2} > T_{A1}$) die HBTs früher ausfallen ($t_1 > t_2$). Unter der Voraussetzung, dass der für die Änderung des Parameters zuständige Prozess durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben wird, ergibt sich für das Verhältnis der beiden Ausfallzeiten, das gleich dem Beschleunigungsfaktor A des Prozesses ist:

$$A = \frac{t_2}{t_1} = \frac{r_2}{r_1} = \exp \left\{ -\frac{E_A}{k} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \right\}. \quad (11)$$

Das Produkt der Reaktionsrate r und der Zeit bis zum Ausfall t_f ist eine Konstante [Bert88]. So ist die Zeit t_f bis zum Ausfall bei verschiedenen Temperaturen T_i :

$$t_f = \frac{\text{constant}}{r} = \text{constant} \cdot \exp \left\{ \frac{E_A}{kT} \right\} \quad (12)$$

bzw.

$$\ln t_f = \text{constant} + \frac{E_A}{kT}. \quad (13)$$

Die Gültigkeit der Arrhenius-Gleichung und der Wert der Aktivierungsenergie E_A für einen bestimmten Mechanismus können mithilfe des Arrhenius-Diagramms (Abbildung 5) bestimmt werden. Die logarithmische Auftragung von t_f gegen $1/T_j$ im Arrhenius-Diagramm liefert eine Gerade mit der allgemeinen Gleichung $y = mx + n$. So lässt sich die Aktivierungsenergie E_A aus der Steigung m der Geraden ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass nicht die Umgebungstemperatur selbst wichtig ist, sondern die Temperatur des Bauelements in der aktiven Zone, die sogenannte Junction-Temperatur T_j , die auch ein Maß für die Belastung des HBT's ist. Diese Größe wird in IV.1.2 weiter erläutert und ihre Bedeutung beschrieben.

Die mittlere Lebensdauer der HBTs – die *MTTF* – kann durch Extrapolation der Ausfallzeiten bei erhöhten Temperaturen zu normalen Betriebsbedingungen bestimmt werden. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten, sollten die Messungen bei vielen verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden (Abbildung 5).

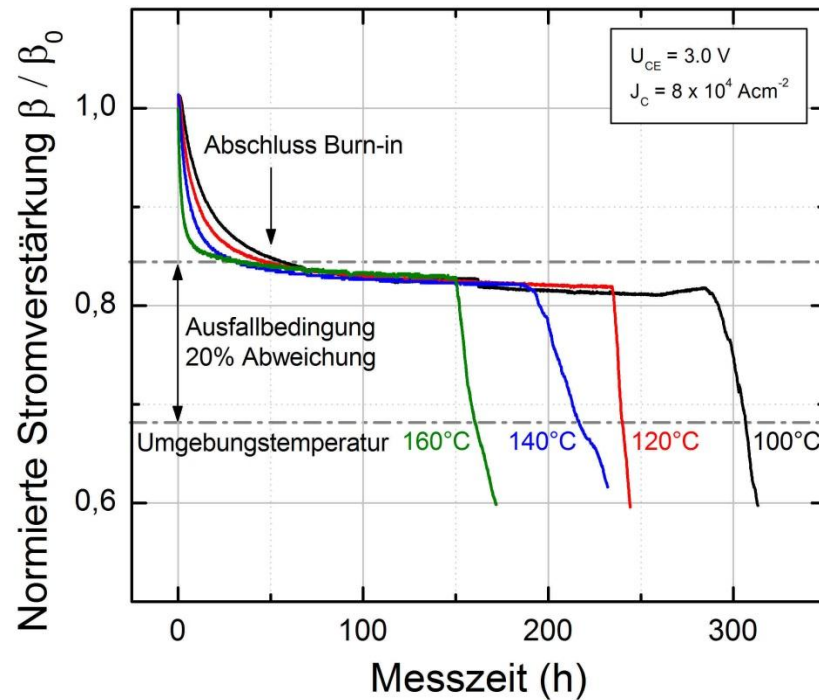


Abbildung 4: Einfluss der Temperatur auf die Lebensdauer von HBTs. Dargestellt ist der Verlauf der normierten Stromverstärkung bei verschiedenen Umgebungstemperaturen. Durch die höhere Umgebungstemperatur wird die Alterung beschleunigt. Der Ausfall wird als Abweichung der Stromverstärkung um 20% von ihrem stabilen Wert definiert.

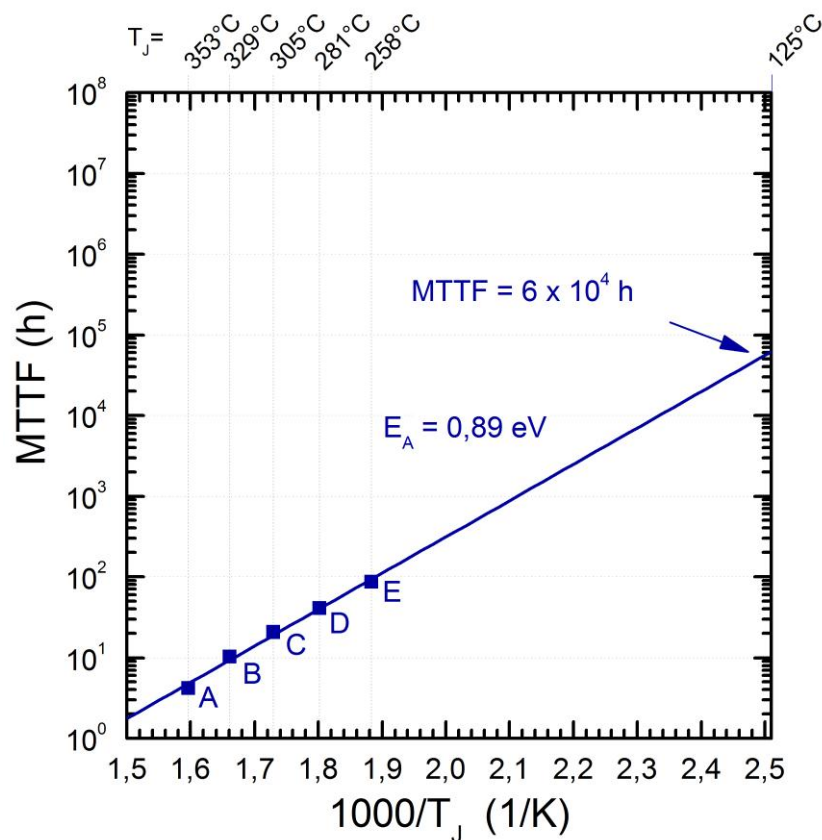


Abbildung 5: Arrhenius-Diagramm zur Bestimmung des MTTF und der Aktivierungsenergie E_A . Die MTTF wird durch die Extrapolation der Daten zu $T_J = 125^\circ\text{C}$ ermittelt. Die Aktivierungsenergie E_A entspricht der Steigung des Geraden.

II.2.1.2. Spannungs- und Strombeschleunigung

Spannung und Strom sind zwei sehr wichtige Größen zur Beschleunigung von Ausfallmechanismen, die in Halbleitertransistoren beobachtet wurden. Der Einfluss dieser beiden Parameter hängt im Allgemeinen auch vom Transistortyp ab.

Eine erhöhte Spannung (in vielen Fällen verbunden mit einem erhöhten elektrischen Feld) führt zur Beschleunigung der Alterung durch Durchbruch von Dielektrika, Grenzflächenladungsakkumulation, Ladungsinjektion und Korrosion [Bert88]. Diese Degradationsmechanismen treten insbesondere in unipolaren Transistoren auf und werden dort für beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen durch Spannung genutzt [Amer87].

Der Betrieb von Bauelementen bei erhöhter Stromdichte wird meist benutzt um Ausfallmechanismen zu beschleunigen, die zur Elektromigration in den Leitungen und im Halbleitermaterial führen [Amer87]. Aber auch intrinsische Materialdiffusion von Kontaktmetallen oder zwischen den Schichten des Bauelements sowie die Entstehung und Ausbreitung von Defekten und Versetzungen werden beschleunigt. Diese Degradationsmechanismen werden bei GaAs HBTs erwartet [Hend99],

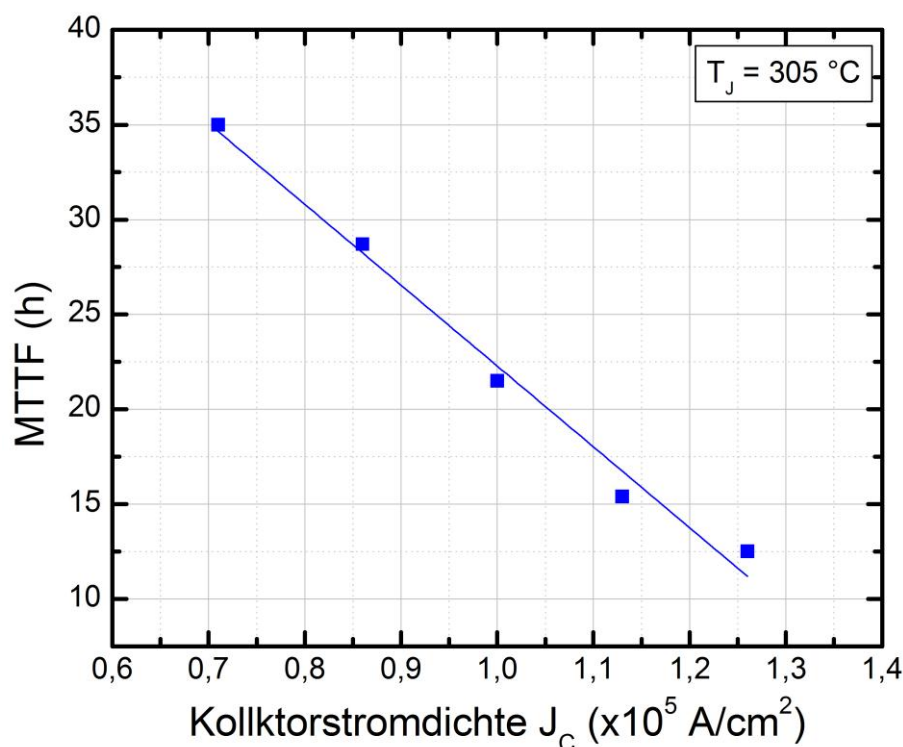


Abbildung 6: Abhängigkeit der Lebensdauer von HBTs von der Kollektorstromdichte bei gleicher Junction-Temperatur. Der Strom beschleunigt die Alterung bei gleicher Belastung und führt zu geringeren Lebensdauern bei steigender Kollektorstromdichte.

daher wird in dieser Arbeit der Strom zur Beschleunigung der Alterung eingesetzt. Aber auch die Temperatur wird hier zur Beschleunigung der Alterung der HBTs eingesetzt, da sie zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer *MTTF* notwendig ist.

Den Einfluss der Kollektorstromdichte auf die Lebensdauer wurde hier bestimmt durch die Alterung der HBTs bei verschiedenen Kollektorstromdichten aber gleicher Junction-Temperatur, um für alle HBTs die gleiche Belastung zu gewährleisten. Es ist deutlich zu erkennen, dass trotz gleicher Junction-Temperatur, also gleicher Belastung – die höhere Kollektorstromdichte die Alterung beschleunigt und die HBTs entsprechend einen geringeren Lebensdauer aufweisen.

II.2.2. Burn-in

Burn-in¹ wird als Begriff für die Änderung von elektrischen Parametern von jungfräulichen Bauelementen verwendet, die zum ersten Mal betrieben werden. Der Wert des Parameters ändert sich zunächst und stabilisiert sich nach einiger Zeit. Der zeitliche Ablauf hängt von den Betriebsbedingungen – Arbeitspunkt, Stromdichte, Temperatur – ab. Mit Burn-in bezeichnet man aber auch den Prozess, bei dem Komponenten für ein System vor dem Einbau getestet und auf ihre Funktionsfähigkeit untersucht werden. Das Ziel solcher Untersuchung ist es, Komponenten, die früh ausfallen zu identifizieren und gleich auszusortieren. Burn-in, also das Einbrennen, stellt aber auch für den Kunden sicher, dass während der ersten Stunden des Betriebs des Bauelements die gewünschten Parameter konstant sind und sich nicht ändern. Frühausfälle von Komponenten tauchen in der ersten Phase der Badewannenkurve auf. Wählt man die Burn-in Periode lang genug und führt den Bauelementen auch noch Stress durch Erhöhung von Strom, Spannung oder Temperatur zu, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die übrig gebliebenen Bauelemente frei von Degradationsursachen sind, die zu einem Frühausfall führen könnten.

Ein Burn-in von Bauelementen ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Ausfallrate über die Zeit die Form der Badewannenkurve hat. Belastet man mehrere Bauelemente für eine bestimmte Zeit, so fallen die mit der höchsten Ausfallrate zuerst aus und können aussortiert werden. Die übrig gebliebenen Bauelemente werden später bei niedrigerer Rate ausfallen. Daher besteht ein Ziel der Ausfallanalyse darin, Frühausfälle zu finden und auszuschalten. Abbildung 6 zeigt den Einfluss des Burn-

in's auf die Ausfallrate der Bauelemente. Sie zeigt den Unterschied im Verlauf der Ausfallraten für Alterung mit und ohne vorherigem Burn-in.

Ursachen für Frühausfälle liegen häufig in der Prozessierung und in der Aufbautechnik. Beispielsweise können Fehler beim Ätzen oder Lift-off, aber auch durch Kontamination oder Fehler beim Hantieren und Aufbauen bzw. Einhäusen der Schaltungen zu Frühausfällen führen. Für Bauelemente, die bereits gehäust sind, können Tests bei periodisch wechselnden Temperaturen Erkenntnisse über die Qualität der Bonddrähte und das Gehäuse bringen [Amer87]. Studien über die Auswirkung der Erhöhung der Umgebungstemperatur von HBTs haben gezeigt, dass die Aktivierungsenergie E_A der Frühausfälle bei 0,37 bis 0,42 eV liegt [Peck78].

Das Ziel in dieser Arbeit ist es die mittlere Lebensdauer $MTTF$ der HBTs und die Aktivierungsenergie E_A der Degradationsmechanismen mithilfe der beschleunigten Alterung zu ermitteln. Ein Burn-in der HBTs wurden nicht durchgeführt.

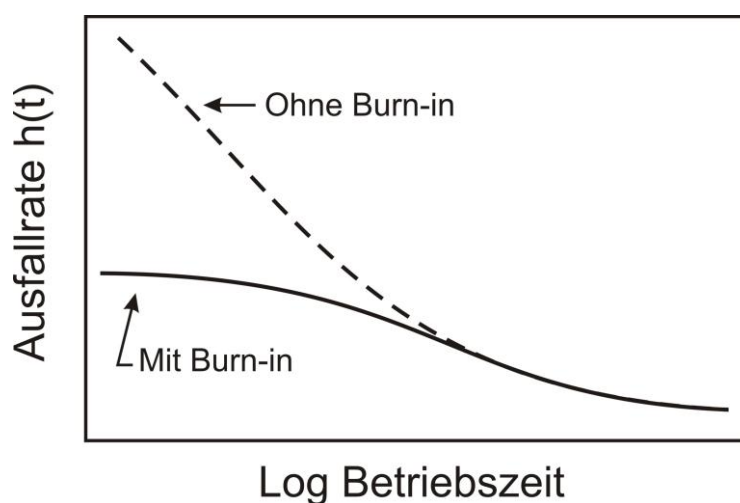


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Ausfallrate von Bauelementen mit und ohne Burn-in [Bert88].

¹ Burn-in, *englisch* für Einbrennen

III. Der Heteroübergang-Bipolartransistor (HBT)

Das Konzept des Bipolartransistors wurde 1948 von W. Shockley vorgeschlagen und realisiert (Abbildung 7) [USPa48]. Damit ist dieser der erste und älteste Transistortyp. Beim Bipolartransistor steuert ein kleiner Strom I_B im Basis-Emitter-Kreis einen stärkeren Strom I_C im Kollektor-Emitter-Kreis. In [USPa48] wurde auch das Prinzip des Heteroübergang-Bipolartransistors (HBT) zum ersten Mal beschrieben, das 1957 von H. Kroemer weiterentwickelt wurde. Dabei wird die Unterdrückung eines Leckstroms durch gezielte Ausnutzung von Bandstruktur-Eigenschaften unterschiedlicher Halbleitermaterialien ausgenutzt. Kroemer erkannte darin das große Potenzial des HBT-Prinzips für Hochfrequenz- und Hochleistungsanwendungen [Kroe57]¹.

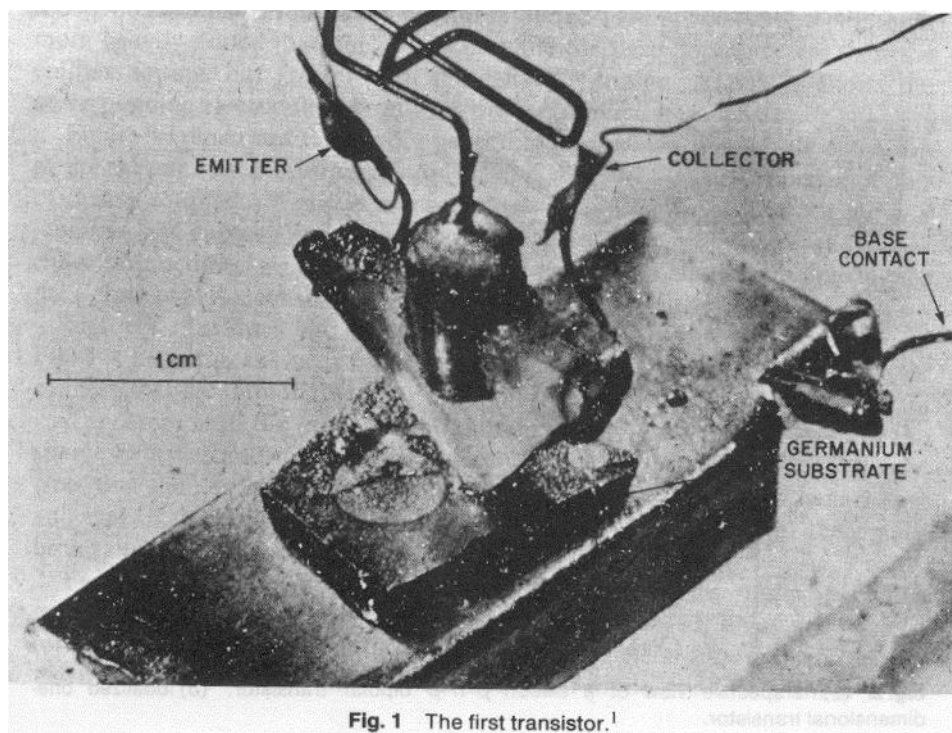


Abbildung 8: Transistor nach Shockley, Bardeen und Brattain (Original).

¹ SHOCKLEY und KROEMER wurden für Ihre Arbeiten und Beiträge zur Erforschung von Halbleitern mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. SHOCKLEY erhielt 1956 den Nobel Preis für Physik zusammen mit BARDEEN und BRATTAIN für „ihre Forschungsarbeiten über Halbleiter und die Entdeckung des Transistoreffektes“ [15] und Herbert KROEMER erhielt diese Auszeichnung im Jahre 2000 gemeinsam mit ALFEROV und KILBY für ihre „Grundlagenforschung über Informations- und Kommunikationstechnologie“ [16].

Bis Anfang der Siebziger Jahre bestand keine technologische Möglichkeit, die Ideen von Shockley und Kroemer in die Praxis umzusetzen. Erst mit der Einführung der Flüssigphasenepitaxie LPE¹ und später der Molekularstrahlepitaxie MBE² und der metallorganischen Gasphasenepitaxie MOVPE³ änderte sich die Situation rapide. MBE und MOVPE sind bis heute die wichtigsten Technologien zur Herstellung von III-V-Halbleiterschichten.

Der HBT ist wegen seiner hohen Grenzfrequenz von bis zu 1 THz vor allem für Hochfrequenzanwendungen interessant. Besonders der stetig wachsende Telekommunikationssektor erzeugt eine steigende Nachfrage nach breitbandigen Leistungsverstärkern (40-150 W) bei hohen Frequenzen zum Beispiel für Basisstationen (~ 900 MHz, ~ 1800 MHz, ~ 2000 MHz). Besonders gefragt sind diese für die zukünftigen Generationen der Mobilfunkstandards.

III.1. Aufbau und Konzept des HBT

In dieser Arbeit wird der n-p-n Heteroübergang-Bipolartransistor (HBT) behandelt, der aus einer p-dotierten Basisschicht und jeweils n-dotierten Emitter- und Kollektorschichten besteht, wobei die Emitterschicht meistens höher dotiert ist. Der HBT ist im Gegensatz zu anderen Transistortypen, wie dem Feldeffekttransistor (FET), ein vertikales Bauelement. Der Stromfluss erfolgt senkrecht zu den Grenzflächen der Schichten und ist dadurch weniger empfindlich gegenüber Grenzflächeneigenschaften.

Beim HBT ist der Basis-Emitter-Übergang ein Heteroübergang – also ein Übergang zwischen verschiedenen Halbleitermaterialien. Bei HBTs werden die Materialien so gewählt, dass die Bandlücke des Emittersmaterials (InGaP) größer als die des Basismaterials (GaAs) ist (Abbildung 8). Dies führt zu einer Barriere im Valenzband und verringert die Injektion von Löchern aus der Basis in den Emitter was zu höherer Stromverstärkung führt.

¹ LPE: *englisch*: „Liquid-Phase Epitaxy“

² MBE: *englisch*: „Molecular Beam Epitaxy“

³ MOVPE: *englisch*: „Metal Organic Vapor Phase Epitaxy“

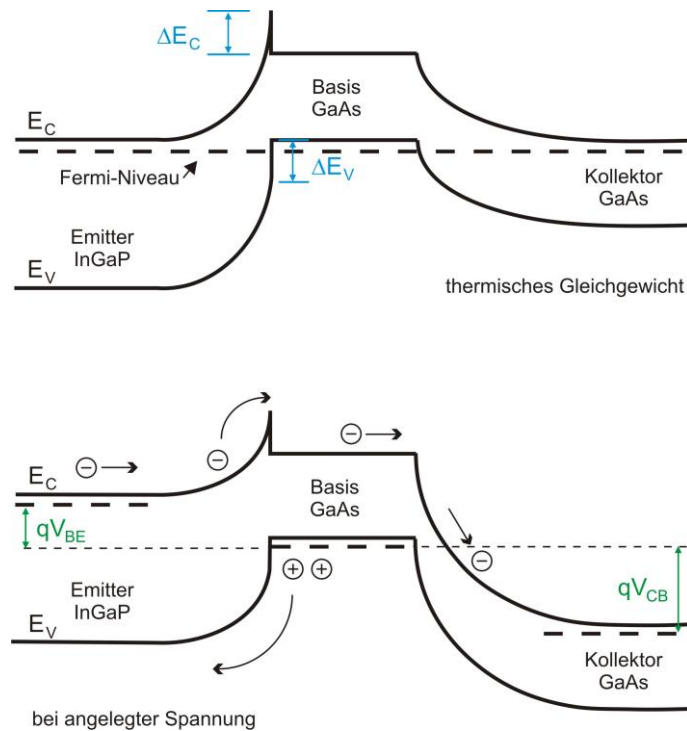


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Bänderdiagramms n - p - n HBTs: (oben) im thermischen Gleichgewicht, (unten) bei angelegten positiven Spannungen V_{BE} und V_{CB} .

III.1.1. Funktionsweise des HBT

Um die Funktionsweise des HBTs grundlegend darzustellen, sollen die Stromkomponenten im Bauelement betrachtet werden (Abbildung 8):

- I_n – die Hauptstromkomponente des HBT: Elektronen werden vom Emitter in die Basis und den Kollektor injiziert.
- I_p – Strom von Löchern, die aus der Basis in den Emitter rückinjiziert werden. Dieser Strom wird durch die Valenzband-Diskontinuität ΔE_V des Basis-Emitter-Übergangs, durch das Heterostrukturdesign, reduziert.
- I_{rB} – Rekombinationsstrom infolge von Elektron-Loch-Rekombination innerhalb der hoch p -dotierten Basis.
- I_{rEB} – Rekombinationsstrom infolge von Elektron-Loch-Rekombination innerhalb der Raumladungszone des Emitter-Basis-Übergangs.
- I_{rS} – Rekombinationsstrom an der Oberfläche der Basis und des Emitters. Dieser Strom wird primär durch die Bauelementetechnologie und die Oberflächenrekombinationseigenschaften der relevanten Materialien bestimmt.

- I_{gCB} – Generationsstrom infolge von Elektron-Loch-Paar Generation innerhalb der Basis-Kollektor-Raumladungszone.

Der Strombilanz für die drei Anschlüsse des Transistors sieht dann wie folgt aus:

$$I_E = I_n + I_p + I_{rEB} + I_{rS}, \quad (1)$$

$$I_B = I_p + I_{rB} + I_{rEB} + I_{rS} - I_{gCB}, \quad (2)$$

$$I_C = I_n - I_{rB} + I_{gCB}. \quad (3)$$

Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, werden die Elektronen vom Emitter in die Basis injiziert und fließen durch sie in den Kollektor (I_n). Der Basistransportfaktor α_T ist definiert als das Verhältnis des Elektronenstroms, der den Kollektor erreicht ($I_n|_{x=w_B} = I_C$), zum Elektronenstrom, der aus dem Emitter injiziert wird (I_n):

$$\alpha_T = \frac{I_C}{I_n} < 1 \quad (4)$$

Das Verhältnis des Elektronenstroms, der aus dem Emitter in die Basis injiziert wird ($I_n|_{x=0}$), zum Gesamtstrom über den Heteroübergang, wird als Emitterinjektionseffizienz γ bezeichnet:

$$\gamma = \frac{I_n}{I_E} < 1 \quad (5)$$

Dass beide Größen kleiner als Eins sind, wird durch den parasitären Löcherstrom, der aus der Basis (I_p) zugeführt wird, hervorgerufen.

Die wichtigste Kenngröße im Gleichstromverhalten des Bipolartransistors ist die Stromverstärkung β , das Verhältnis des Eingangstromes zum Ausgangstrom. In der sogenannten Emitterschaltung, wo der Emitter auf Masse liegt, die Basis als

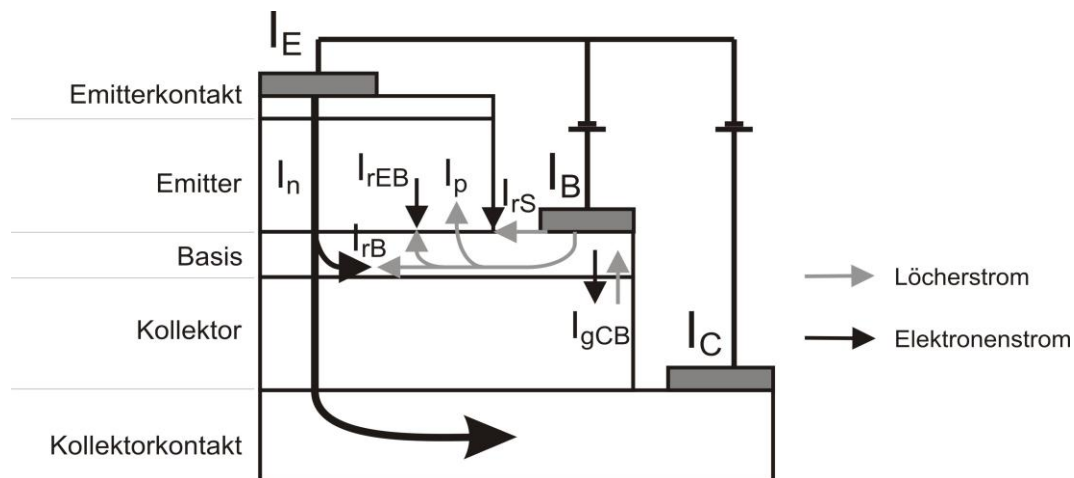


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Stromkomponenten des HBTs in Emitterschaltung.

Eingang und der Kollektor als Ausgang geschaltet werden, entspricht die Stromverstärkung dem Verhältnis des Kollektorstroms zum Basisstrom,

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} > 1 \quad (6)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) erhält man:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_n - I_{rB} + I_{gCB}}{I_p + I_{rB} + I_{rEB} + I_{rS} - I_{gCB}} < \frac{I_n}{I_p} = \beta_{ideal} \quad (7)$$

Aus Gleichung (7) erkennt man, dass die Stromverstärkung abgesehen von den Hauptstromkomponenten (I_n , I_p) durch diverse Rekombinations- und Generationsströme – in der Basis, an der Emitter-Basis-Grenzfläche sowie an der Basisoberfläche – bestimmt wird.

Kroemer zeigte in [Kroe82] zum ersten Mal, dass das Heterostrukturdesign des HBTs es im Vergleich zum konventionellen Bipolartransistor ermöglicht, die Basis in Verhältnis zum Emitter höher zu dotieren:

$$\beta_{0,HBT} \approx \frac{N_D^+}{N_A^-} \frac{v_B^n}{v_E^p} \exp\left\{\frac{\Delta E_V}{kT}\right\} \quad (8)$$

N_D^+ und N_A^- sind die komplett ionisierten Donatoren bzw. Akzeptoren in Emitter bzw. Basis, v_B^n und v_E^p stellen die kombinierten Drift- und Diffusionsgeschwindigkeiten von Elektronen in der Basis und der Löcher im Emitter dar. ΔE_V ist die Valenzbanddiskontinuität, T die Temperatur und k die Boltzmann-Konstante [Kroe82].

Der für den HBT entscheidender Zusammenhang ist, dass solange die Valenzbanddiskontinuität ΔE_V am Heteroübergang zwischen Emitter und Basis ein Vielfaches von kT ist, das Dotierungsverhältnis sehr klein (1:100 und kleiner) gewählt werden kann, um eine hohe (> 100) Stromverstärkung β zu erzielen. Beispielsweise führt ein ΔE_V von 0,3 eV aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs zu einem Faktor größer 10^5 , was Dotierungsverhältnisse N_D^+/N_A^- von 10^{-2} und kleiner ermöglicht. Das ist vorteilhaft, weil man durch Wahl einer möglichst hohen Basisdotierung den Basisschichtwiderstand klein halten kann, was sich positiv auf die Hochfrequenzeigenschaften (> 1 GHz) des HBTs auswirkt. Gerade dies macht das HBT-Prinzip attraktiv für Hochfrequenzanwendungen.

III.2. Herstellung von HBTs

Die Herstellung von III-V Bauelementen lässt sich in zwei Bereiche einteilen: Epitaxie und Prozessierung. Zunächst werden dünne kristalline Halbleiterschichten auf ein kristallines Substrat aufgewachsen. Im zweiten Schritt werden die Wafer mit den Epitaxieschichten prozessiert – dies beinhaltet das Strukturieren der Bauelemente und Aufbringen der Kontaktmetallisierung. Aber auch das Abdünnen der Wafer, die Rückseitenmetallisierung, und das Vereinzeln und der Aufbau der Transistoren fallen in diesem Bereich. Daher sind beide Bereiche für die Qualität der Bauelemente verantwortlich.

III.2.1. Epitaxie

Zur Abscheidung von III/V-Halbleiterschichten gibt es verschiedene Verfahren. Weite Verbreitung haben MBE und MOVPE erlangt. Bei der MBE wird der Wafer im Ultrahochvakuum (Hintergrunddruck $p < 10^{-10}$ mbar) beschichtet, wobei die Quellmaterialien bei mehreren Hundert Grad Celsius erhitzt und verdampft werden. Am Ferdinand-Braun-Institut wird zur Herstellung der Halbleiterschichten die MOVPE-Technologie verwendet. Mit der MOVPE lassen sich die für die Bauelementefunktion wichtigen Halbleiterkristallschichten reproduzierbar bis auf eine Monolage genau (ca. 2,5 Angström) bei einer Wachstumsrate von 0,1 nm/s bis 1 nm/s wachsen. Dabei besteht die Möglichkeit, während des Wachstums die Materialzusammensetzung und Dotierung innerhalb weniger Nanometer zu variieren. Durch die einfache Skalierbarkeit der Anlagen und Prozesse ist sie ideal für die Massenherstellung geeignet.

Da die Ausgangsstoffe für Verbindungshalbleiter oft Metalle sind, können diese nicht bei niedrigen Temperaturen in elementarer Form in die Gasphase eingebracht werden. Daher werden bei dieser Epitaxiemethode die Ausgangsstoffe in Form von metallorganischen Verbindungen (z. B. Trimethylgallium) und Hydriden (z. B. Ammoniak, Phosphin, Arsin) zur Verfügung gestellt. Der Vorteil dieser Verbindungen ist ein moderater Dampfdruck bei Raumtemperatur. Die Ausgangsstoffe können bei Normaldruck verdampfen und durch Rohrleitungen transportiert werden. Durch das Arbeiten mit organischen Verbindungen werden im Gegensatz zur MBE immer relativ große Mengen von Fremdatomen (C, O, H) in den Kristall eingebaut und es lassen sich daher keine so reinen Halbleiterkristalle wie mit der MBE

herstellen. Das Trägergas Wasserstoff passiviert häufig die für die Leitung notwendigen Akzeptoren. Der eingebaute Wasserstoff lässt sich nur zum Teil durch Tempern entfernen. Kohlenstoff kann beim Galliumarsenid-Wachstum gezielt zur p-Typ-Dotierung eingesetzt werden. Das MOVPE-Wachstum lässt sich in vier Bereiche einteilen (Abbildung 10):

- Die Ausgangsstoffe werden von den Quellen mittels Trägergas (H_2) zum geheizten Substratkristall transportiert. In der Gasphase können in der Nähe der heißen Oberfläche ($\geq 650\text{ °C}$) Vorzerlegungen und chemische Reaktionen auftreten.
- Die Quellenmoleküle diffundieren aus dem Trägergasstrom zur Substratoberfläche. Je nach Temperatur findet an der Substratoberfläche eine Zerlegung der Ausgangsstoffe in Metallatome und organische Verbindungen statt. Die Metallatome werden dann anschließend auf der Oberfläche adsorbiert und die organischen Verbindungen mit dem Trägergas abtransportiert.
- Die Oberflächenprozesse während des Wachstums spielen eine entscheidende Rolle. Für die erwünschten glatten Oberflächen ist eine ausreichende Mobilität der Ausgangsstoffe an der Oberfläche wichtig. Das Material wird an energetisch bevorzugten Plätzen des Kristallgitters – wie Stufen oder Ecken – eingebaut. Kennzeichnend für das sogenannte Stufenflusswachstum ist, dass eine Monolage sich weitgehend schließt,

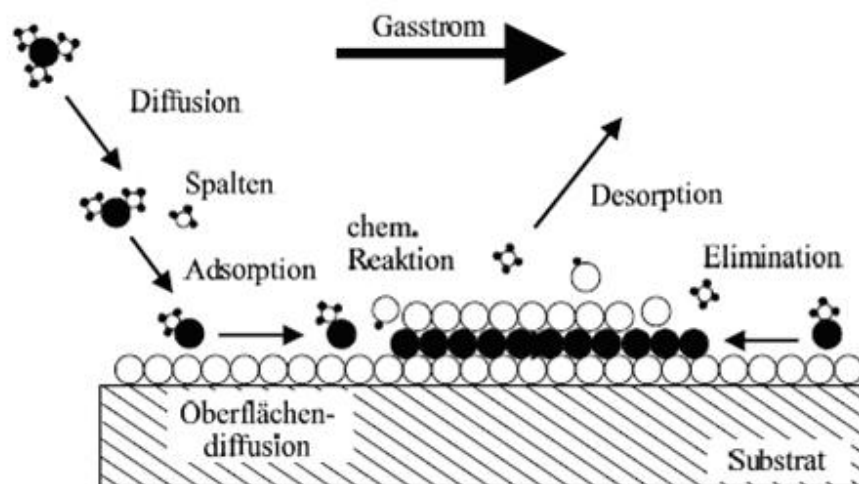


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Epitaxiewachstums.

bevor eine neue zu wachsen beginnt, was im Hinblick auf eine möglichst glatte Oberfläche anzustreben ist. Hierfür muss die Oberflächendiffusionslänge im Bereich der Terrassenbreiten liegen.

- Desorption von Reaktionsprodukten, in der MOVPE im Wesentlichen Kohlenstoffradikale.

In Abbildung 11 und Tabelle 1 sind die HBT-Schichten und ihre Eigenschaften beschrieben.

Tabelle 1: Schichtstruktur der HBTs.

Zielstruktur		Dicke (nm)	Dotierungshöhe
Emitterkontakt	InGaAs:Si	55	1,5 e19
Emitterkontakt	GaAs:Si	100	5,0 e19
Emitter	GaInP:Si	30	3,0 e17
Basis	GaAs:C	90	4,0 e19
Kollektor	GaAs:Si	1000	2,0 e16
Ätzstopp	GaInP:Si	20	2,0 e16
Subkollektor	GaAs:Si	620	5,0 e18
Substrat			

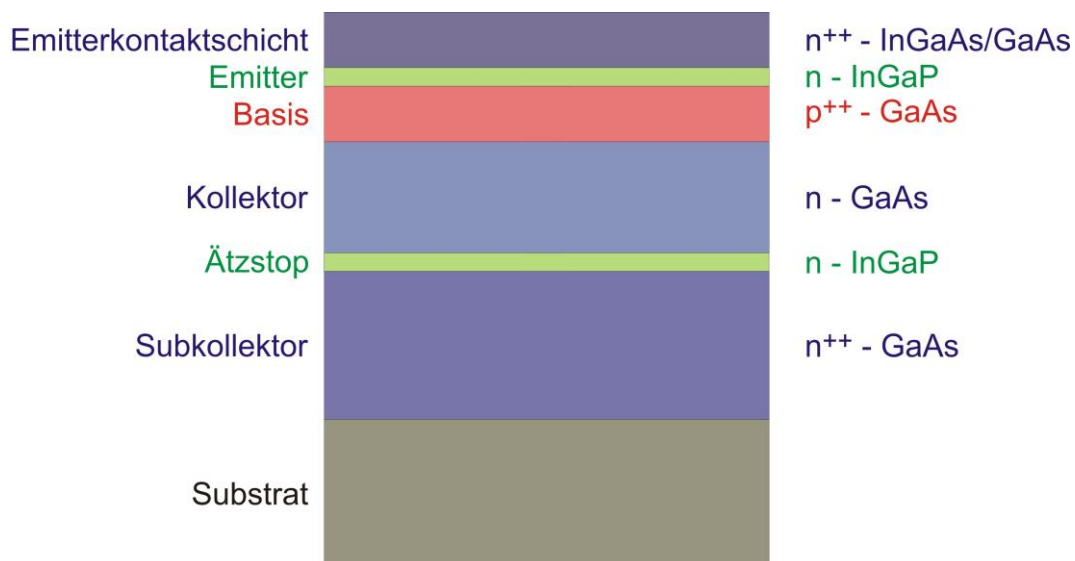


Abbildung 12: Schematische Darstellung der HBT-Schichtstruktur.

Die wesentlichen Schritte beim Epitaxieablauf zur Herstellung der Schichten für die in dieser Arbeit untersuchten GaAs-HBTs sind [Maas07]:

- Hochheizen des Substrats auf 650 °C unter AsH₃-Gegendruck zur Stabilisierung der GaAs-Oberfläche, Deoxidation der Substratoberfläche um eventuell vorhandene Verunreinigungen zu entfernen.
- Wachstum des Subkollektors.
- Temperaturrampe auf 600 °C und Wachstum einer InGaP-Ätzstoppschicht.
- Wachstum des Kollektors mit Temperaturerhöhung auf 650 °C wegen höherer Wachstumsrate nach 100 nm, und Reduktion auf 600 °C für die letzten 100 nm vor der Basis wegen glatter Morphologie.
- Unterbrechung: Abkühlung auf 540 °C.
- Wachstum der Basis bei 540 °C.
- Unterbrechung: Hochheizen auf 600 °C.
- Wachstum des Emitters bei 600 °C.
- Unterbrechung: Abkühlen auf 500 °C
- Wachstum der Emitterkontaktschicht bei 500 °C
- Abkühlen des Substrats in N₂-Atmosphäre; Minimierung H-Eindiffusion.

Die am empfindlichsten auf die Wachstumsbedingungen reagierende Schicht in der gesamten HBT-Struktur ist die GaAs:C-Basisschicht. Aufgrund der Instabilität der hochdotierten Basisschicht ($4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) bei Temperaturen oberhalb von 600 °C erfolgt das Wachstum der auf die Basis folgenden Schichten unterhalb dieser Temperatur [Brun02].

Das Bauelementverhalten des HBT's erfordert eine perfekte Basis-Emitter-Grenzfläche. Rekombination an Grenzflächendefekten verringert die erreichbare Stromverstärkung und erhöht die Wahrscheinlichkeit der Entstehung weiterer Defekte und folglich den Ausfall des HBT's. Die Optimierung dieser Grenzfläche spiegelt sich in den Ergebnissen wider, die in dieser Arbeit vorgestellt werden.

III.2.2. HBT Herstellungsprozess

Die epitaxiierten Wafer werden für die Strukturierung der Bauelemente prozessiert, wobei man für die Strukturierung der Schichten zwei Verfahren verwendet: Das erste Verfahren ist die Lift-off Technologie, die benutzt wird, um Metallschichten auf dem Wafer aufzubringen und zu strukturieren. Das Zweite ist das Ätzverfahren. Hier werden die Epitaxieschichten strukturiert. Für beide Verfahren wird zunächst der Wafer belackt und durch eine Maske belichtet. Der Lack wird dann entwickelt, dabei wird der belichtete Bereich des Lacks – welcher nun nach dem Belichten gegen spezielle Lösungsmittel nicht mehr resistent ist – entfernt. Ab hier unterscheiden sich die beide Verfahren (Abbildung 12): Bei der Lift-off Technologie wird der Wafer dann metallisiert und im nächsten Schritt wird der Lack mit der darüber liegenden Metallschicht entfernt (Lift-off). Übrig bleiben Metallstrukturen an den Stellen, wo der Lack vorher entfernt worden war. Im Ätzverfahren wird nach der Lackentwicklung der Wafer nass- oder trockenchemisch geätzt. Die Auswahl des Ätzverfahrens hängt von dem zu ätzenden Schichtmaterial ab. Selektivität, Ätzgeschwindigkeit, Ätztemperatur und Kanten schärfe sind wichtige Kenngrößen. Von Vorteil ist, dass unterschiedliche Halbleitermaterialien selektiv geätzt werden können und einige Schichten selbst als Ätzstoppschichten verwendet werden können.

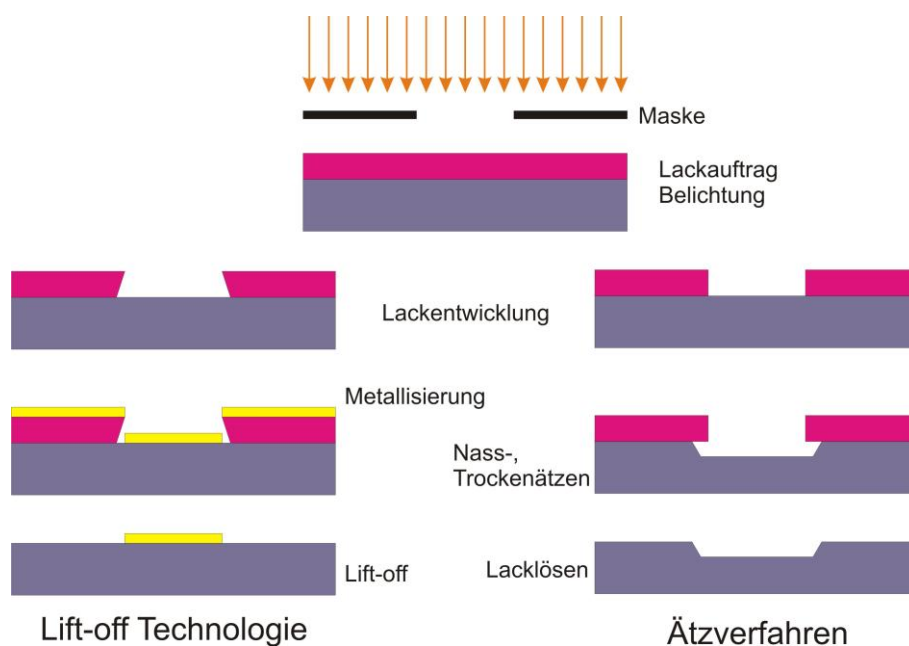


Abbildung 13: Verfahren zur Strukturierung: Lift-off Technologie und Ätzverfahren.

Nachfolgend werden die jeweiligen Prozessebenen zur Herstellung des Transistors erläutert (Abbildung 13, A-H):

Zunächst wird auf dem Wafer WSiN aufgesputtert (A). Diese Schicht soll den Emitterkontakt thermisch stabilisieren und die Kontaktmetalldiffusion verhindern. Darauf wird dann der Emitterkontakt ($\text{Ti}_{30\text{ nm}}/\text{Pt}_{40\text{ nm}}/\text{Au}_{430\text{ nm}}$) abgeschieden (B) und strukturiert. Diese Strukturen dienen dann auch als Ätzmaske für die Trockenätzung und das Entfernen von WSiN-, InGaAs- und GaAs-Emitterkontaktschichten (C). Die InGaP-Emitterschicht fungiert hier als Ätzstopp. Würde man diese Schicht auch abätzen, käme es an der freien GaAs-Basisoberfläche (Abbildung 14) aufgrund freier Zustände zu Rekombinationsströmen, die zur Reduktion der Stromverstärkung führen, welche dann stark von der Emitter-Peripherie abhängig ist. Um die Oberflächenzustände zu passivieren, braucht man eine Ledge-Schicht aus einem Material mit geringerer Oberflächenrekombinationsrate, das vollständig verarmt sein sollte. Das Emittermaterial InGaP entspricht diesen Anforderungen und wird daher selbst als Ledge-Passivierung verwendet. So kann auf den Einsatz zusätzlicher Materialien zur Passivierung der Oberfläche verzichtet werden. Die Basiskontakte werden zunächst auf die InGaP Schicht aufgebracht (D) und dann durch Tempern einlegiert, bis diese die Basisschicht kontaktieren (E). Die Zusammensetzung des Kontaktmaterials ($\text{Pt}_{20\text{ nm}}/\text{Ti}_{30\text{ nm}}/\text{Pt}_{40\text{ nm}}/\text{Au}_{410\text{ nm}}$) wurde so gewählt, dass ein weiteres Eindiffundieren in die Basis während des Betriebs verhindert wird [Neba00]. Im nächsten Schritt wird die Basismesa strukturiert (F). Auch hier wird eine dünne InGaP Schicht unterhalb des Kollektors als Ätzstoppschicht verwendet. Die Kollektorkontakte ($\text{Ni}_{5\text{ nm}}/\text{Ge}_{30\text{ nm}}/\text{Au}_{60\text{ nm}}/\text{Ni}_{20\text{ nm}}/\text{Au}_{385\text{ nm}}$) werden dann auf dem Subkollektor aufgebracht (G), wobei auch hier die Kontakte durch die InGaP-Ätzstoppschicht durchlegiert werden. Um die HBTs von den benachbarten Bauelementen und Strukturen elektrisch zu isolieren, wird dann der Subkollektor bis zum Substrat geätzt (H). In manchen Prozessen wird für die Isolation eine Ionenimplantation (Heliumionen) verwendet. Sie hat den Vorteil, dass die Gesamthöhe des Bauelements nicht weiter vergrößert wird. Damit ist die Bauelemente-strukturierung beendet.

Nun werden die Passivierungsschicht (SiN) und die Verbindungsmetallisierung aufgebracht. Die Passivierungsschicht soll einerseits die seitlichen Flächen der Emitttermesa passivieren, andererseits fungiert sie auch als Isolationsschicht für die später darüber liegende Verbindungsmetallisierung. Die Verbindungsmetallisierung wird folgendermaßen aufgebracht: In einem mehrstufigen Prozess werden die Verbindungskontakte galvanisch aufgebracht. Dabei wird der Emitterfinger – bei Multifinger-Transistoren die Emitterfinger – durch Luftbrücken („thermal shunt“) mit den Emitterkontaktpads verbunden. Dadurch soll die im Transistor entstehende

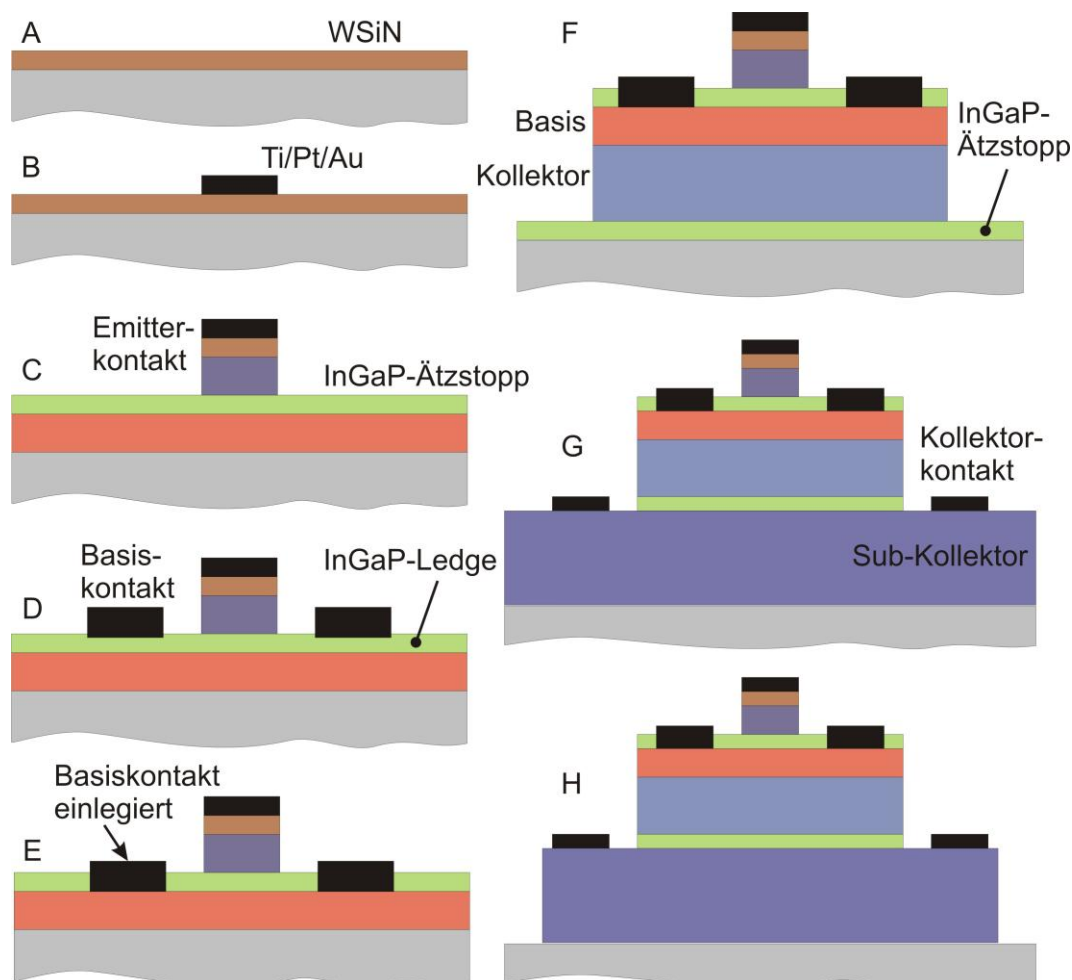


Abbildung 14: A-H Schematische Darstellung des HBT-Prozessablaufs

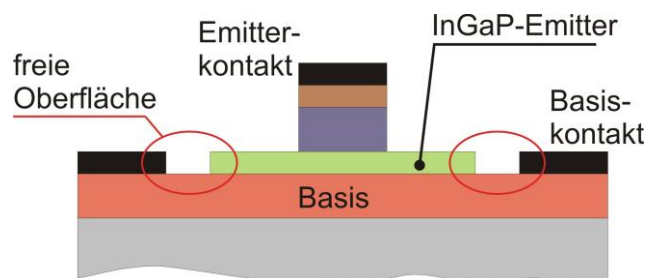


Abbildung 15: Freie Basisoberfläche ohne Ledge

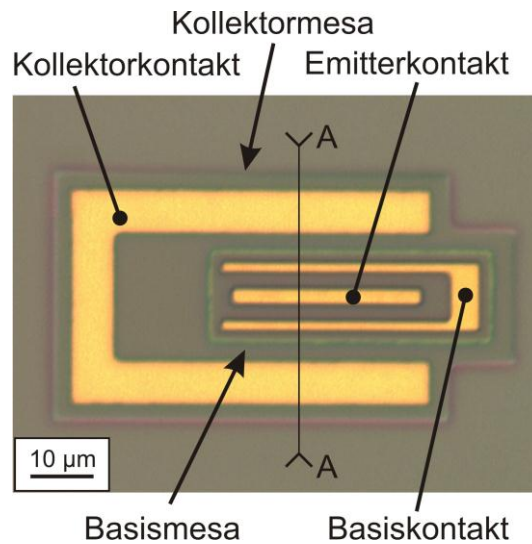


Abbildung 16: HBT im Prozess nach dem Ätzen des Kollektormesas (Schritt H in Abbildung 14).

Wärme schnell aus dem Bauelement abgeführt werden.

Abbildung 15 zeigt einen HBT im Prozess nach dem Ätzen der Kollektormesa (Schritt H in Abbildung 14). In der Mitte ist der Kontakt des $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ großen Emitterfingers sehr deutlich sichtbar, umgeben von dem U-förmigen Basiskontakt, die gemeinsam auf der rechteckigen Basismesa liegen. Das nach rechts offene U ist der Kollektorkontakt und die gesamte Struktur liegt auf der Kollektormesa. Ein komplett prozessierter GaAs HBT ist in Abbildung 17 in Draufsicht dargestellt.

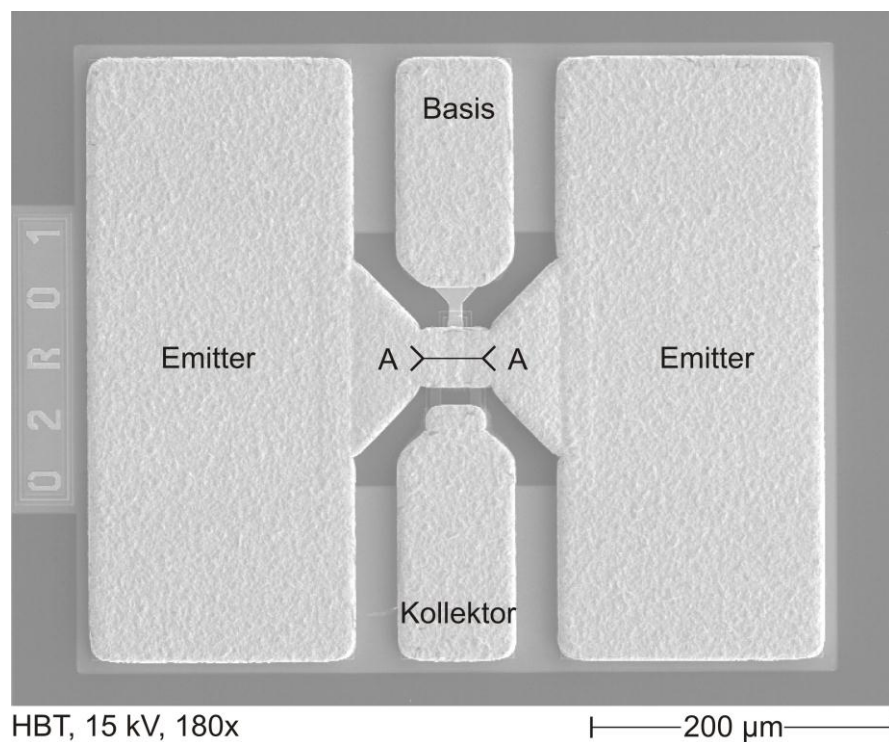


Abbildung 17: Fertig prozessierter GaAs HBT.

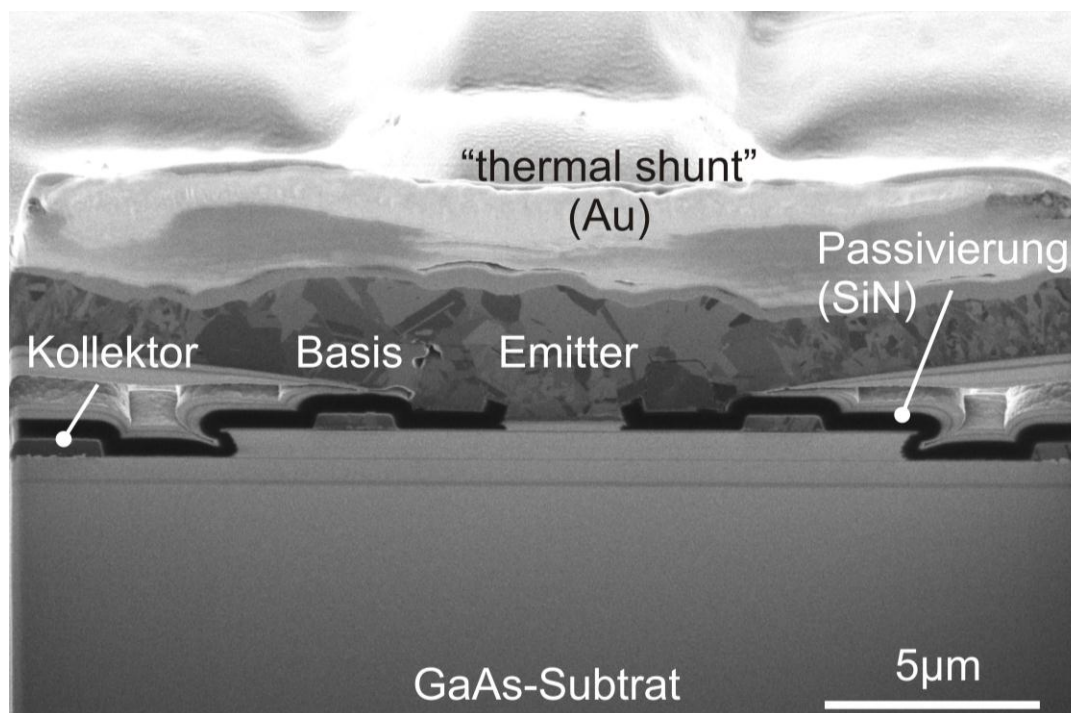


Abbildung 18: SEM-Aufnahme des Querschnitts eines fertig prozessierten HBTs präpariert mit fokussierten Ionenstrahlen (FIB).

Ein mit fokussierten Ionenstrahlen präparierter und aufgenommener Querschnitt eines fertig prozessierten HBT's ist in Abbildung 18 dargestellt. Der Schnitt (A↔A) ist in den Abbildungen 15 und 16 zur Orientierung eingezeichnet. In der Mitte ist die Emitttermesa zu sehen, die von oben mit der Luftbrücke aus Gold verbunden ist (thermal shunt). Der InGaP-Emitter selbst ist nur als eine dunkle Linie am unteren Rand der Mesa zu erkennen. Die darunter liegenden Basis- und Kollektorschichten können hier nicht unterschieden werden. Die zweite InGaP-Ätzstoppschicht ist am unteren Rand der zweiten Mesa sichtbar. Die Kollektorkontakte befinden sich auf dem Subkollektor. Die gesamte HBT Struktur ist von der Passivierung (SiN) umgeben, die in der Abbildung nahezu schwarz abgebildet ist.

III.2.3. Mögliche Schwachstellen von HBTs

Aus der Literatur bekannte Degradationsmechanismen für HBTs sind rekombinationsbeschleunigte Defektmechanismen, Störstellen in der Bandlücke, Degradation der Kontakte und Metalldiffusion ins Halbleitermaterial [Hend97]. Aber auch Materialdiffusion in der Basis spielt eine Rolle [Hafi90].

In Abbildung 19 ist schematisch der Ort der möglichen Degradationsmechanismen dargestellt. Im aktiven Bereich der HBTs spielen die Qualität der funktiona-

len Schichten und die Qualität ihrer Grenzflächen eine sehr große Rolle. Eine defektfreie Herstellung der Schichten führt zur Verringerung der nicht-strahlenden Rekombination. Dadurch entsteht weniger freiwerdende Energie, die zur Entstehung weiterer Defekte führen könnte. Außerdem führt die Verringerung des Rekombinationsstroms in der Strombilanz zur höheren Stromverstärkung der HBTs.

Die extrem hohe Dotierung der Basis hat eine Verringerung der Gitterkonstante von GaAs:C zur Folge, was zu Fehlanpassungen zwischen der Basis und dem Emitter führt. Dabei können dann Versetzungen entstehen, die in den Emitter wandern und zur Verringerung der Zuverlässigkeit führen können [Shir95]. Jedoch ist bei den HBTs, die in dieser Arbeit untersucht werden, trotz einer hohen Basisdotierung von mehr als $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ nur eine Gitterfehlanpassung von weniger als 0,5 ppm gemessen worden [Brun02]. Bei der geringen Dicke der Basisschicht (ca. 90 nm) reicht diese Gitterfehlanpassung nicht aus, um zusätzliche Versetzungen zu generieren.

Bei hohen Junction-Temperaturen ($> 340^\circ \text{C}$) tritt vermehrt eine Degradation der ohmschen Kontakte und eine Metaldiffusion ins Halbleitermaterial (*metal spiking*) ein. Das ist auf eine lokale Temperaturerhöhung (*localized heating*) an den Kontakten zurückzuführen [Hend99]. Die temperaturabhängigen Mechanismen werden durch die Selbsterwärmung des HBTs aktiviert und treten bei hohen Junction-Temperaturen und schon bei relativ niedrigen Stromdichten ($< 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$) auf. Sie führen zu geringen mittleren Lebensdauern von $< 1000 \text{ h}$ und wurden bei Aktivierungsenergien von 0,8-1,8 eV beobachtet [Magi92].

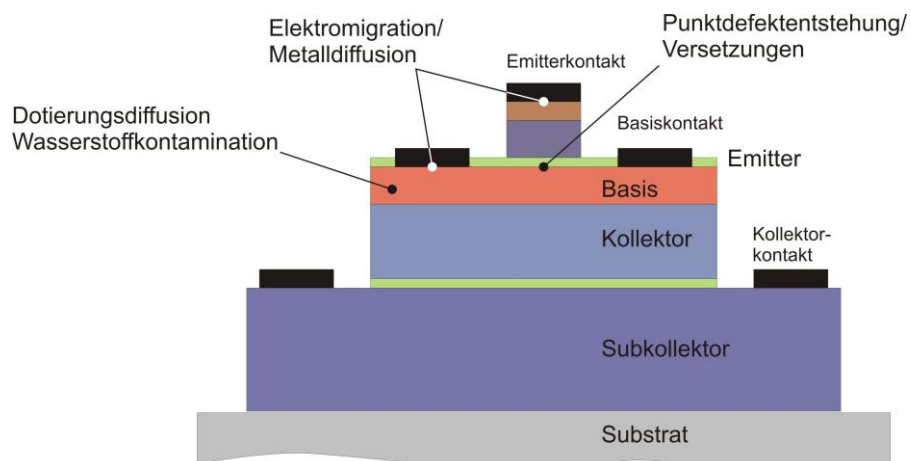


Abbildung 19: Schematische Darstellung der möglichen Degradationsmechanismen in GaAs HBTs.

III.3. HBT Eigenschaften

Die Beschreibung der HBT-Eigenschaften in diesem Abschnitt beschränkt sich auf das Verhalten des Transistors in der sogenannten Emitterschaltung. In dieser Konfiguration liegt der Emitter auf Masse. Bei Hochfrequenzanwendungen werden die Basis als Eingang und der Kollektor als Ausgang des Transistors verwendet. Der Vorteil dieser Konfiguration ist die hohe Leistungsverstärkung, weshalb die meisten Verstärker in der Emitterschaltung realisiert werden.

III.3.1. DC Eigenschaften

Das grundsätzliche Gleichstromverhalten des Bipolartransistors wird durch das Diodenverhalten der p/n-Übergänge und die daraus resultierende exponentielle Abhängigkeit der Ströme von der Spannung bestimmt. Für die Charakterisierung des Bipolartransistors werden vorwiegend zwei Kennlinientypen gemessen: Der sogenannte Gummel-Plot und die Ausgangskennlinie des Transistors, die beide in der Emitterschaltung (Abbildung 20) gemessen werden. Bei der Messung des Gummel-Plots werden Basis- und Kollektorstrom – I_B und I_C – in Abhängigkeit der Kollektor-Emitter-Spannung gemessen (Abbildung 21), wobei diese mit der Basis-Emitter-Spannung auf dem gleichen Potenzial gehalten wird (also $U_{BC} = 0$ V). Die Ströme zeigen nach Shockley im Idealfall eine exponentielle Abhängigkeit über einen großen Bereich der angelegten Spannung:

$$I_{B/C} = I_{B_0/C_0} \left(\exp \left\{ \frac{qU_{BE}}{nkT} \right\} - 1 \right) \quad (9)$$

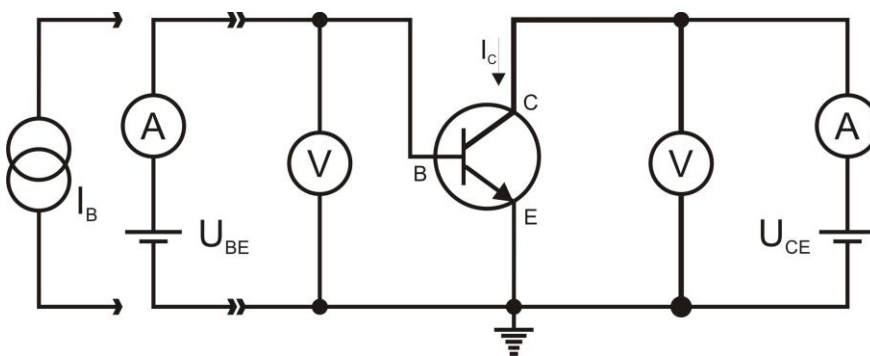


Abbildung 20: Schaltung der HBT-DC-Charakterisierung. Der Gummel-Plot (I_C , $I_B = f(U_{CE} = U_{BE})$) wird bei gleicher Spannung am Kollektor und an der Basis gemessen: $U_{CE} = U_{BE}$. Für die Messung der Ausgangskennlinien ($I_C = f(U_{CE}, I_B)$) wird an der Basis eine Stromquelle eingesetzt.

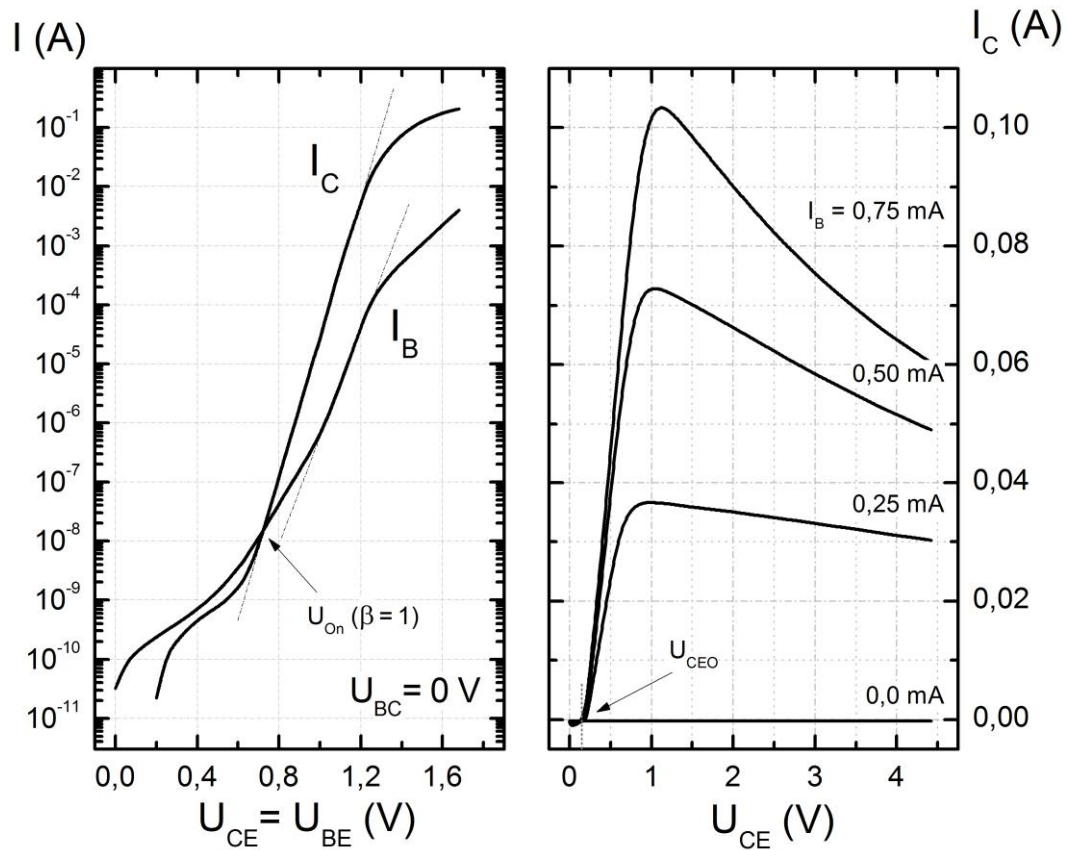


Abbildung 21: Gummel-Plot (links) und Ausgangskennlinienfeld (rechts) eines npn-HBTs.

Die Abweichung der Kennlinien vom ideal-exponentiellen Verlauf wird durch den Idealitätsfaktor n_B bzw. n_C für die Basis bzw. den Kollektor beschrieben. Die aus dieser Kennlinie bestimmte Stromverstärkung $\beta = I_C / I_B$ lässt sich in drei Bereiche einteilen: Niedrig-, Normal- und Hochinjektion (Abbildung 22). Der Niedriginjektionsbereich wird durch Generations- und Rekombinationsströme an der Oberfläche und in der p-n-Raumladungszone bestimmt, wohingegen der Hochinjektionsbereich durch den zunehmenden Einfluss des Basisbahnwiderstands gekennzeichnet ist, welcher im Abknicken der Strom-Spannungskennlinie sichtbar wird.

Die zweite wichtige Kennlinie – die Ausgangskennlinie – wird bei konstantem Basis-Strom (in manchen Fällen auch bei konstanter Basis-Spannung) gemessen, während die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} variiert und der Kollektor-Strom I_C gemessen wird (Abbildung 21). Dabei nimmt mit steigender Kollektor-Emitter-Spannung der Spannungsabfall über den Basis-Kollektor-Übergang zu. Beim HBT ist der Kollektorstrom für nicht zu hohe Basisströme ($< 0,25$ mA) unabhängig von U_{CE} . Der Early-Effekt, welcher die Verringerung der effektiven Basisweite mit zunehmender Kollektor-Emitter-Spannung und dem damit verbundenen Anstieg der

Stromverstärkung beschreibt, ist für den HBT aufgrund der hohen Basisdotierung vernachlässigbar. Bei GaAs-HBTs nimmt der Kollektorstrom bei hohen Basisströmen aus thermischen Gründen ab. Bei steigendem Leistungsumsatz steigt die Temperatur im aktiven Bereich des Transistors, wodurch die Stromverstärkung abnimmt.

Die Kollektor-Emitter-Offsetspannung U_{CEO} ist für einen Kollektorstrom $I_C = 0$ A definiert (Abbildung 20) und wird durch die unterschiedliche Einsatzspannung des Emitter-Basis- und Basis-Kollektor-Übergangs bestimmt. Im Hinblick auf Anwendungsgebiete der Schaltungen in mobilen batteriebetriebenen Geräten (Batterielebensdauer) sollte die Offsetspannung minimiert werden.

Ein sehr wichtiger Gleichstrom-Parameter von Transistoren ist die Durchbruchspannung – bei Bipolartransistoren die Kollektor-Emitter-Durchbruchspannung BV_{CEO} . Diese wird im Wesentlichen durch Avalanche-Generation von Ladungsträgern in der Kollektor-Raumladungszone bestimmt. Falls die Kollektordicke bei gegebener Kollektordotierung einen bestimmten Wert unterschreitet, kann die Durchbruchspannung auch durch einen Durchgriff der Raumladungszone bis zur Kontaktschicht bestimmt sein („punch-through“). Ein „Punch-through“ der Basis-Raumladungszone bis hin zum Emitter kann aufgrund der hohen Basisdotierung ($> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) verhindert werden.

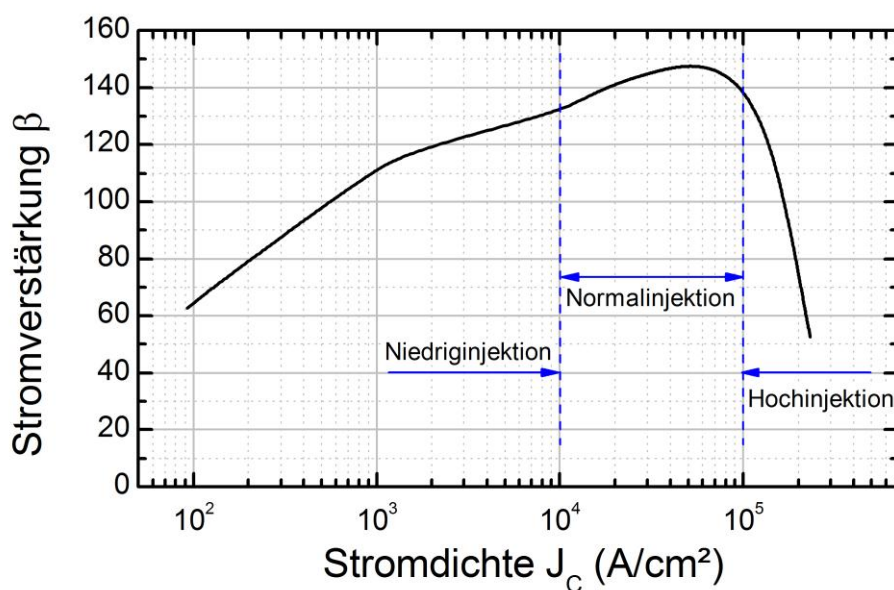


Abbildung 22: Verlauf der Stromverstärkung β als Funktion der Kollektorstromdichte J_C unterteilt in drei Bereiche: Niedrig-, Normal- und Hochinjektion.

IV. Lebensdaueruntersuchungen

Die Untersuchung der Zuverlässigkeit von Bauelementen lässt sich in verschiedene Bereiche unterteilen. Die Wafer werden nach der Prozessierung on-wafer Stresstests bei hoher Belastung unterzogen, um eine relative Aussage über deren Lebensdauer treffen zu können. Die Belastung ist für alle untersuchten Wafer gleich. Einige Wafer werden für Langzeituntersuchungen ausgesucht, um das *MTTF* zu bestimmen. Parallel laufen analytische Untersuchungen an degradierten Bauelementen, um die Physik der Degradation zu untersuchen.

In diesem Kapitel werden die Messtechnik, das Messverfahren und die für die Untersuchung der Lebensdauer der HBTs nötigen zusätzlichen Messungen erläutert. Danach werden Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen, sowohl die Kurzzeitdegradation, der sogenannte Burn-in, als auch die Langzeitalterung vorgestellt und diskutiert, sowie die Einflüsse verschiedener Parameter auf den Burn-in und auf die Lebensdauer der HBTs diskutiert. Besonderes Augenmerk gilt dem Einfluss verschiedener Prozessparameter und der Aufbautechnik auf die Zuverlässigkeit der HBTs.

IV.1. Messverfahren

Zur Bestimmung der Lebensdauer von HBTs werden diese bei thermischer und elektrischer Belastung beschleunigt gealtert. Wärme und Stromdichte sind die beiden wichtigsten externen Stressfaktoren für HBTs [Hend99]. Das beschleunigte Altern verringert zwar die Messzeit für die Bestimmung der Lebensdauer enorm, jedoch muss die Belastung so gewählt werden, dass die aktivierten Degradationsmechanismen mit denen des normalen Betriebs vergleichbar sind [Hu92].

Im Folgenden werden nun die notwendigen Messungen zur Bestimmung der Junction-Temperatur T_j erläutert, um die Belastung der HBTs während der Alterung zu definieren. Die Kenntnis dieser Temperatur wird auch für die *MTTF*-Bestimmung benötigt.

IV.1.1. Bestimmung der Junction-Temperatur T_J

Ein Maß für die Belastung des Transistors ist die sogenannte Junction-Temperatur T_J ¹. Sie ist die an einem pn-Übergang durch freigesetzte Verlustwärme vorherrschende Temperatur und lässt sich folgendermaßen berechnen,

$$T_J = T_A + R_{th} P_{Diss}. \quad (10)$$

Dabei ist T_A die Umgebungstemperatur, P_{Diss} ist die Verlustleistung und R_{th} der thermische Widerstand des Transistors. Die Verlustleistung ergibt sich aus:

$$P_{Diss} = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B, \quad (11)$$

wobei der Basis-Emitter-Term auf Grund der großen Stromverstärkung der Transistoren nur einen sehr kleinen Beitrag im Prozentbereich leistet.

Der thermische Widerstand R_{th} in der Gleichung (10) ist jedoch selbst eine Funktion der Verlustleistung P_{Diss} . Diese kann für die Berechnung der Junction-Temperatur näherungsweise nur dann als konstant gesehen werden, wenn die thermische Leitfähigkeit des Materials – hier GaAs – nicht von der Temperatur abhängt [Joyc75]. Dies ist jedoch nicht der Fall. Deshalb muss und eine modifizierte Gleichung für die Bestimmung der Junction-Temperatur verwendet werden [Bovo00]:

$$T_J = T_A \left(\frac{R_{th} \cdot P_{Diss}}{T_A} (1 - n_{eff}) + 1 \right)^{\frac{1}{1-n_{eff}}} \quad (12)$$

wobei R_{th} der thermische Widerstand bei Raumtemperatur und n_{eff} ein Effektivwert des Koeffizienten der thermischen Leitfähigkeit ist, der für in dieser Arbeit vergleichbare HBTs zu $n_{eff} = 0,8$ bestimmt wurde [Bovo00].

Die Bestimmung der Junction-Temperatur T_J ist für die Lebensdauerbestimmung essenziell. Aus (12) erkennt man, dass bei Kenntnis der Umgebungstemperatur T_A und der Verlustleistung P_{Diss} für die Berechnung der Junction-Temperatur der thermische Widerstand R_{th} bekannt sein muss. Diese Größe kann aus elektrischen Messungen bestimmt werden.

¹ Junction Temperature ist die englische Bezeichnung für die Temperatur an einem pn-Übergang, die durch freigesetzte Verlustwärme vorherrscht. Eine Übersetzung ins Deutsche ist unüblich, kann aber als „Sperrschichttemperatur“ bezeichnet werden

IV.1.2. Der thermische Widerstand R_{Th}

Mithilfe der *thermischen Simulation* des Bauelements kann der thermische Widerstand berechnet werden. Zusätzlich erhält man Informationen über Wärmeverteilung und thermische Kopplung im Bauelement im jeweiligen Arbeitspunkt [Olav02]. Auch Einflüsse diverser Parameter wie Waferdicke, Luftbrückengeometrie („thermal shunt“) und Geometrie des Bauelements (Emitterfingerdimensionen und -abstände) können untersucht werden. Jedoch ist eine solche Simulation nicht ausreichend zuverlässig. Der thermische Widerstand kann durch *optische Methoden* experimentell bestimmt werden. So lässt sich mit einer Infrarot-Thermokamera die Oberflächentemperatur recht genau bestimmen [vdWe04]. Jedoch reicht die Ortsauflösung von ca. 5-10 μm nicht aus, um präzise Messungen durchzuführen, da diese Auflösung in der Größenordnung der Emitterfingerbreite von 3 μm liegt. Eine weitere Methode zur Bestimmung des thermischen Widerstandes sind dünne Flüssigkristallfilme auf dem Bauelement. Diese ändern ihre Polarisierungseigenschaften bei einer bestimmten Temperatur und so können Isothermen sichtbar gemacht werden [Mino86]. Nachteil dieser Methode ist, dass die Kristalle nur für eine bestimmte Temperatur geeignet sind und daher keine Temperaturprofile erstellt werden können.

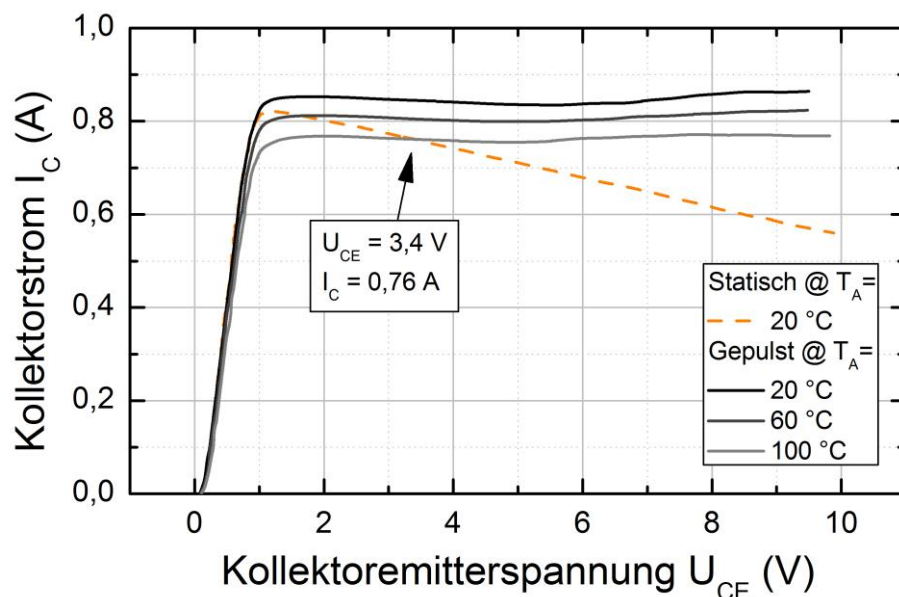


Abbildung 23: Bestimmung des R_{th} mit gepulster Kennlinienmessung. Aus dem Schnittpunkt der statischen Messung mit dem 100 °C-Ast der gepulsten Messung erhält man: $R_{th} = \Delta T_S / P_{Diss} = (100 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) / (3,4 \text{ V} \cdot 0,76 \text{ A}) = 29 \text{ K/W}$

Daher ist die Verwendung von elektrischen Messungen die am besten geeignete Methode, um den thermischen Widerstand der Bauelemente vor der Lebensdaueruntersuchung zu bestimmen. Dazu existieren verschiedene Methoden. Bei allen Methoden erhält man einen Durchschnittswert des thermischen Widerstands für das gesamte Bauelement, aber keine Information über die Temperaturverteilung oder sogenannte „hot spots“. Die bekanntesten Methoden wurden von Dawson [Daws92], Liu und Yuksel [Liu95] und Bovolon [Bovo98] entwickelt. Sie basieren auf dem Prinzip, eine temperaturabhängige Größe – wie V_{BE} und β – zu messen. Es werden statische elektrische Messungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Mit den Messparametern – Verlustleistung P_{Diss} und Umgebungstemperatur T_A – lässt sich der thermische Widerstand dann bestimmen.

Eine weitere Möglichkeit sind gepulste elektrische Messungen [McIn96]. Voraussetzung für diese Methode ist, dass Pulslänge und Wiederholrate nicht zur Selbsterwärmung des Transistors führen [Wei96]. Das Messprinzip ist jedoch einfach: Die Ausgangskennlinie wird bei verschiedenen Umgebungstemperaturen gepulst gemessen. Dadurch ist die Junction-Temperatur nahezu gleich der Umgebungstemperatur. Werden diese Kennlinien mit statischen Messungen verglichen, kann aus dem Schnittpunkt der statischen und gepulsten Kennlinie und der Gleichung $R_{th} = \Delta T_S / P_{Diss}$ der thermische Widerstand bestimmt werden (Abbildung 23).

In dieser Arbeit wurde die Methode von Bovolon eingesetzt. Scott hat die verschiedenen Methoden zur Bestimmung des thermischen Widerstandes miteinander verglichen [Scot01] und folgende Vorteile der Methode von Bovolon festgestellt: Zunächst kann diese Methode bei niedrigeren Verlustleistungen und kleineren Bereichen der Ausgangskennlinien angewendet werden. Andererseits kann aus dem Ergebnis erkannt werden, wenn die Voraussetzungen nicht mehr gelten, und so die Daten fehlerhaft werden. Diese Fehler zeigen sich als starke Abweichung des thermischen Widerstands als Funktion der Verlustleistung P_{Diss} , z. B. bei Einbeziehung der Daten im Sättigungsbereich der Kennlinien bei der Bestimmung des thermischen Widerstands (Abbildung 26).

IV.1.2.1. Methode von Bovolon

Bei der Berechnung des thermischen Widerstands nach Bovolon werden nur kleine Änderungen der Verlustleistung und der Umgebungstemperatur betrachtet [Bovo98]. Dabei wird angenommen, dass nur die Temperatur zu Änderungen in der Basis-Emitter-Spannung V_{BE} und der Stromverstärkung β führen kann, sofern der Arbeitspunkt gleich bleibt. Der thermische Widerstand wird bei dieser Methode aus Ausgangskennlinien bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass nur die Änderung der Temperatur bekannt sein muss und nicht ihr absoluter Wert. Der thermische Widerstand kann hier für jeden Arbeitspunkt berechnet werden und so erhält man auch die Abhängigkeit von der Verlustleistung. Die Einfachheit der Messung und der Auswertung stellt einen großen Vorteil dar. Drei Messpunkte werden gemessen und zueinander ins Verhältnis gesetzt: ein Referenzpunkt $\beta(T_{A1}, P_{Diss1})$ bei der Umgebungstemperatur T_{A1} und der Verlustleistung P_{Diss} und je ein Punkt mit geringfügig veränderter Umgebungstemperatur $\beta(T_{A2}, P_{Diss1})$ und ein mit geringfügig veränderter Verlustleistung $\beta(T_{A1}, P_{Diss2})$ (Abbildung 24).

Voraussetzung ist, dass die Temperatur- und Verlustleistungsdifferenz so

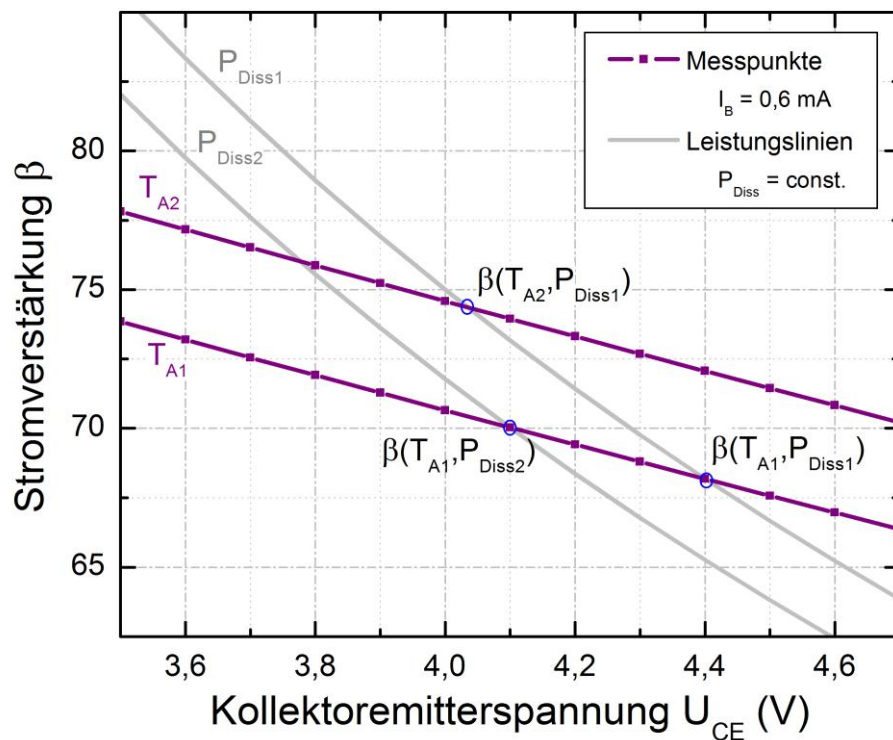


Abbildung 24: Diagramm zur Veranschaulichung der Größen zur Bestimmung des thermischen Widerstandes nach Bovolon [Bovo98].

klein ist, dass die Änderung von β linear genähert werden kann:

$$\begin{aligned}\beta(T_{A1}, P_{Diss1}) &= \beta(T_{A2}, P_{Diss1}) + \left. \frac{\Delta\beta}{\Delta T_J} \right|_{T_J=T_{J1}} \cdot (T_{A1} - T_{A2}) \\ \beta(T_{A1}, P_{Diss1}) &= \beta(T_{A1}, P_{Diss2}) + \left. \frac{\Delta\beta}{\Delta T_J} \right|_{T_J=T_{J1}} \cdot R_{TH}(P_{Diss1} - P_{Diss2}).\end{aligned}$$

Löst man beide Gleichungen nach $\left. \frac{\Delta\beta}{\Delta T_J} \right|_{T_J=T_{J1}}$ auf und setzt diese gleich, so erhält man als Bestimmungsgleichung für R_{th} [Bovo98]:

$$R_{th} = \frac{\frac{\beta(T_{A1}, P_{Diss1}) - \beta(T_{A1}, P_{Diss2})}{P_{Diss1} - P_{Diss2}}}{\frac{\beta(T_{A1}, P_{Diss1}) - \beta(T_{A2}, P_{Diss1})}{T_{A1} - T_{A2}}}. \quad (14)$$

Hier erkennt man, dass nur die Temperaturdifferenz eine Rolle spielt. Der thermische Widerstand kann also an beliebigen Arbeitspunkten bestimmt werden, sofern lokal im gewählten Lastpunkt nur kleine Temperatur- und Leistungsänderungen in die Berechnung eingehen.

Für Lebensdaueruntersuchungen wurden nahezu ausschließlich HBTs mit einem Emitterfinger mit einer Fläche von $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ und einer ca. $16 \mu\text{m}$ dicken Metallisierung untersucht. Für bestimmte Untersuchungen wurden auch HBTs mit un-

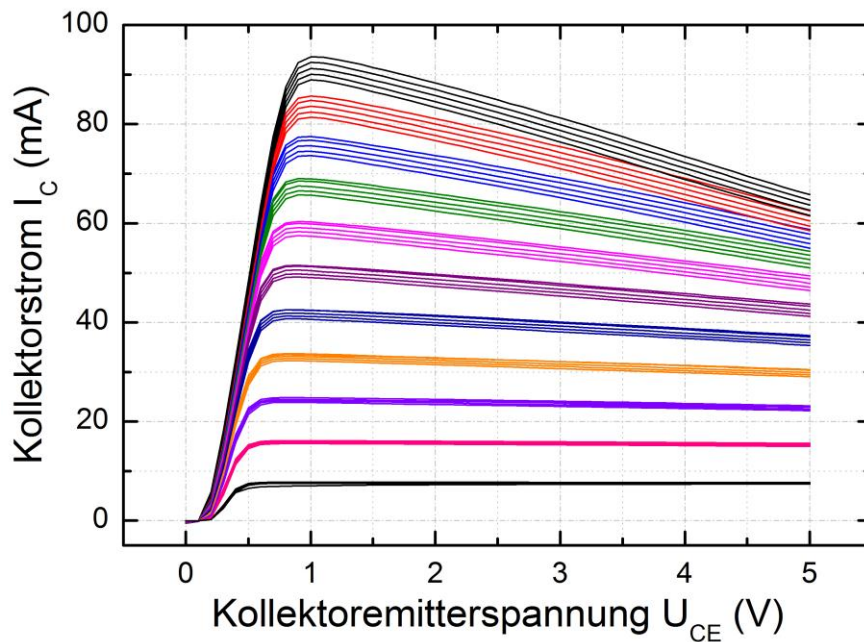


Abbildung 25: Ausgangskennlinie eines HBTs mit $1 \times 3 \times 30 \mu\text{m}$ Emitterfinger, Messung bei $I_B = 50 \dots 550 \mu\text{A}$ und $T_A = 35 \dots 55^\circ\text{C}$. Der thermischen Widerstandes lässt sich für den Sättigungsbereich der Kennlinie nicht bestimmen, da hier der Kollektorstrom unabhängig von Basisstrom.

terschiedlichen Parametern verwendet. Zum Beispiel wurden zur Bestimmung des Einflusses der Dicke der Metallisierung auf den thermischen Widerstand HBTs mit 3 μm Metallisierung eingesetzt, oder für analytische Untersuchungen wurden Mehrfinger-HBTs verwendet.

Zur Bestimmung des thermischen Widerstandes R_{th} von HBTs nach Bovolon muss zunächst das Ausgangskennlinienfeld bei verschiedenen Temperaturen gemessen werden (Abbildung 25). Dabei ist zu beachten, die Kennlinie nicht bei zu hohen Leistungsdichten zu messen, damit die Eigenerwärmung des Bauelements nicht zu einem nicht-linearen Abfall in der Kennlinie führt. Dies ist besonders bei Leistungstransistoren mit mehreren Emitterfingern zu beachten, wo es zu thermischer Instabilität kommen kann [Lu96], [Rudo04]. Wertet man diese Daten mit der Bovolon-Methode aus, so erhält man den thermischen Widerstand des Bauelements als Funktion der Verlustleistung. (Abbildung 26). Es ist eine lineare Abhängigkeit des thermischen Widerstandes R_{th} von der Verlustleistung P_{Diss} zu beobachten. Für die Bestimmung der Junction-Temperatur T_j muss der entsprechende thermische Widerstand am Arbeitspunkt verwendet werden. Der in Abbildung 26 untersuchte HBT hat einen thermischen Widerstand von $R_{th} = 550 \text{ K/W}$ bei einer Verlustlei-

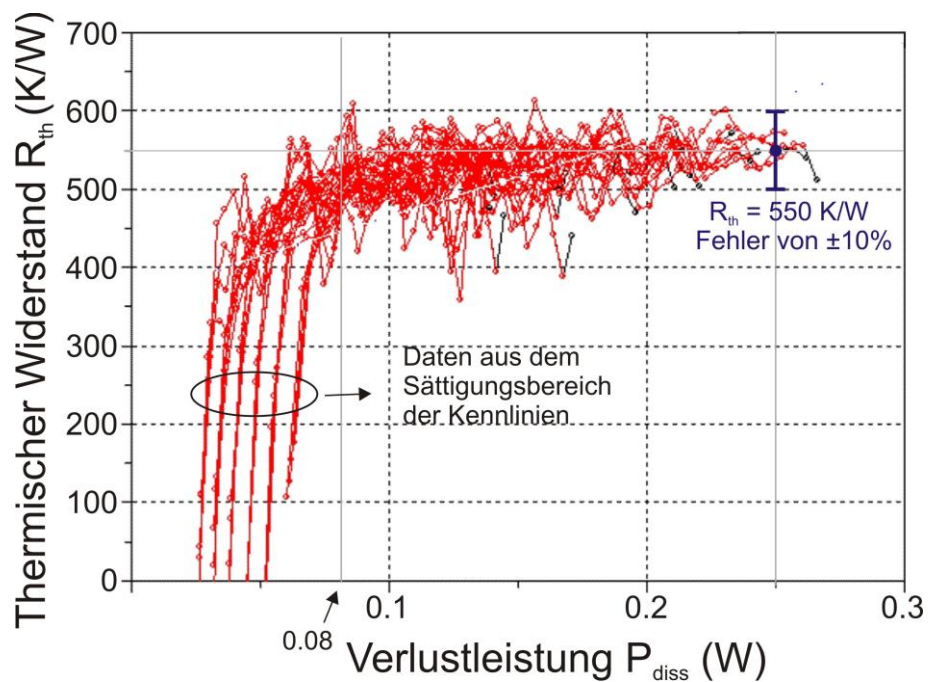


Abbildung 26: Extraktion des thermischen Widerstandes eines HBTs nach Bovolon [Bovo98]. Der hier bestimmte thermische Widerstand liegt bei 550 K/W , mit einem abgeschätzten Fehler von $\pm 10\%$. Die Abweichungen bei niedrigen Verlustleistungen stammen aus dem Sättigungsbereich der Kennlinien. Daher sind die Daten für $P_{Diss} \leq 0.08 \text{ W}$ fehlerhaft

tung von $P_{Diss} = 0,25$ W. Die Genauigkeit der Bestimmung des thermischen Widerstandes lässt sich recht schwierig einschätzen. Es ist wichtig, hier die Umgebungstemperatur T_A so genau wie möglich (hier auf etwa 1%) zu bestimmen und darauf zu achten, dass während der Kennlinienmessung keine Oszillationen auftreten. Trotz größter Achtsamkeit beträgt die Genauigkeit der Bestimmung des thermischen Widerstandes für den untersuchten HBT ca. $\pm 10\%$ (Abbildung 26). Dieser Wert wurde so festgelegt, dass die Fehlerbalken alle Ergebnisse einschließen. Vergleichbare HBT's mit gleicher Emitterdimension, jedoch dickerer Luftbrücke ($20\text{ }\mu\text{m}$), hatten einen etwas kleineren thermischen Widerstand von $R_{th} = 500\text{ K/W}$ [Acho99].

Den Einfluss des Fehlers des thermischen Widerstandes auf die Bestimmung der Junction-Temperatur T_J und auf die damit bestimmte mittlere Lebensdauer der HBTs wurde an einem Beispiel durchgerechnet. Hierfür wurde der Arbeitspunkt bei $U_{CE} = 3,0$ V und eine Stromdichte von $J_C = 1 \times 10^5\text{ A/cm}^2$ ausgewählt, die unter Einbeziehung einer Stromverstärkung von $\beta = 50$ eine Verlustleistung von $P_{Diss} = 0,272$ W ergibt. Es wurden fünf Umgebungstemperaturen $T_A = 100, 125, 150, 175$ und $200\text{ }^\circ\text{C}$ ausgewählt. Der thermische Widerstand der HBTs für dieses Beispiel beträgt $R_{th} = 500\text{ K/W}$. Die Ergebnisse für die Bestimmung der Junction-Temperatur und die jeweiligen prozentualen Fehler sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Ein Fehler von $\pm 10\%$ im thermischen Widerstand führt zu einem maximalen Fehler von $\pm 7,1\%$ in der Bestimmung der Junction-Temperatur, während mit steigender Umgebungstemperatur der prozentuale Fehler geringer wird. Trotzdem führt das im Arrhenius-Diagramm bei der Bestimmung der mittleren Lebensdauer zu einer Lebensdauerdifferenz von einer Größenordnung. Das ist prozentual nicht sehr groß, hat aber trotzdem bei der Auswertung große Auswirkungen (Abbildung 27). Dieser Fehler wird für höhere Aktivierungsenergien größer.

Der Fehler für die Aktivierungsenergie beträgt maximal $\pm 7,2\%$. Hierbei ist zu beachten, dass ein Fehler im thermischen Widerstand für alle Punkte im Arrhenius-Diagramm die gleiche Auswirkung hat. Demzufolge ergibt ein Fehler von des thermischen Widerstandes $+10\%$ eine Verschiebung zu höheren Werten für alle Punkte auf der x-Achse ($1000/T_J$).

R_{th} (K/W)	Fehler (%)	T_A (°C)	P_{diss} (W)	T_J (°C)	Fehler (%)	$1000/T_J$ (K ⁻¹)	Fehler (%)
450	10,00	100	0,272	240,0	6,92	1,95	3,48
500				257,8		1,88	
550	10,00			276,1	7,11	1,82	3,34
450	10,00	125	0,272	263,8	6,24	1,86	3,27
500				281,4		1,80	
550	10,00			299,4	6,40	1,75	3,14
450	10,00	150	0,272	287,8	5,67	1,78	3,08
500				305,1		1,73	
550	10,00			322,8	5,81	1,68	2,97
450	10,00	175	0,272	311,9	5,19	1,71	2,92
500				329,0		1,66	
550	10,00			346,5	5,31	1,61	2,82
450	10,00	200	0,272	336,1	4,78	1,64	2,77
500				353,0		1,60	
550	10,00			370,2	4,89	1,55	2,68

Tabelle 2: Einfluss des Fehlers des thermischen Widerstandes R_{th} auf die Junction-Temperatur T_J und auf $1000/T_J$ zur Bestimmung des MTTF. Die grau unterlegten Zahlen sind die für die Auswertung eingesetzten Werte, die Zahlen über und unter Ihnen sind die Werte mit den maximalen Fehlern.

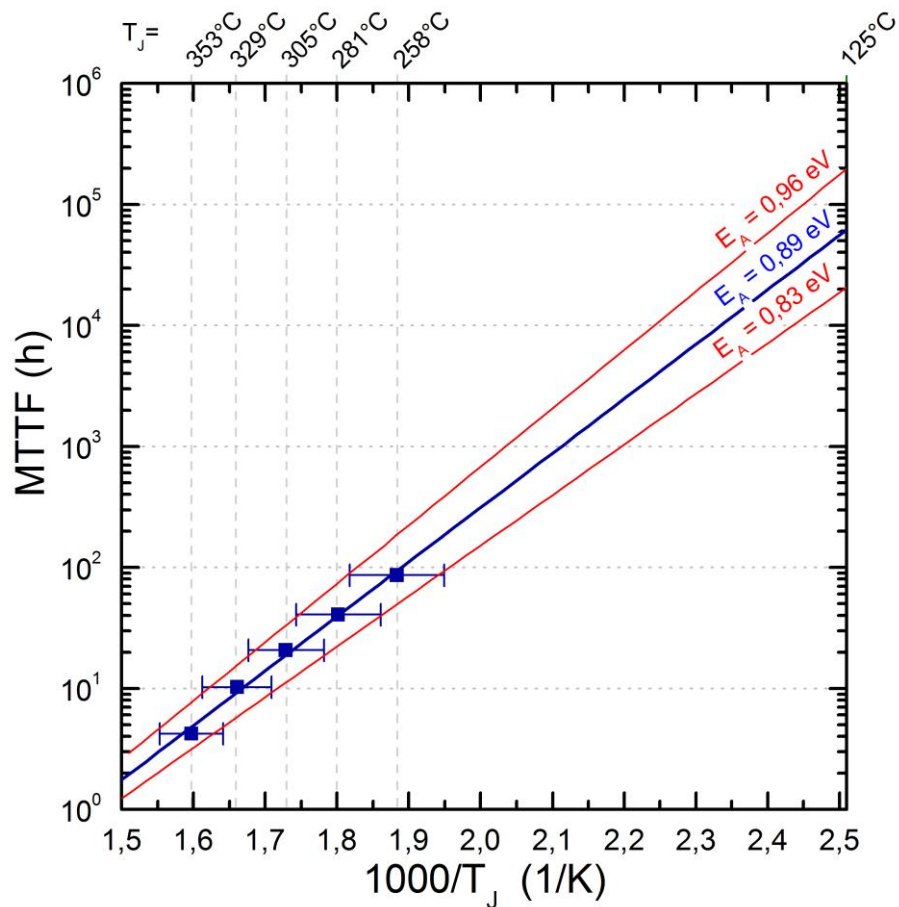


Abbildung 27: Einfluss des Fehlers in R_{th} auf die Junction-Temperatur T_J und folglich auf die mittleren Lebensdauer MTTF und auf die Aktivierungsenergie E_A .

IV.1.2.2. Einfluss von Substratdicke und Luftbrückendicke auf R_{th}

Für Leistungstransistoren, die bei hoher Leistungsdichte betrieben werden, ist der thermische Widerstand des Transistors eine besonders kritische Größe, da sich bei hohen Leistungen der Transistor aufheizt und die Wärme zur Verkürzung der Lebensdauer oder gar zur katastrophalen Degradation führt. Die Wärmequelle des GaAs-Bipolartransistors sitzt im Kollektor, da hier die größte Verlustleistung auftritt. Die Ableitung der Wärmeenergie erfolgt aus dem aktiven Transistorgebiet in beide Richtungen zum Substrat bzw. zum Emitterkontakt mit den Galvanikgoldbrücken. Für den weiteren Wärmetransport spielen die Wärmeleitfähigkeiten des Substrats und der Luftbrücken eine große Rolle und müssen entsprechend der Leistung

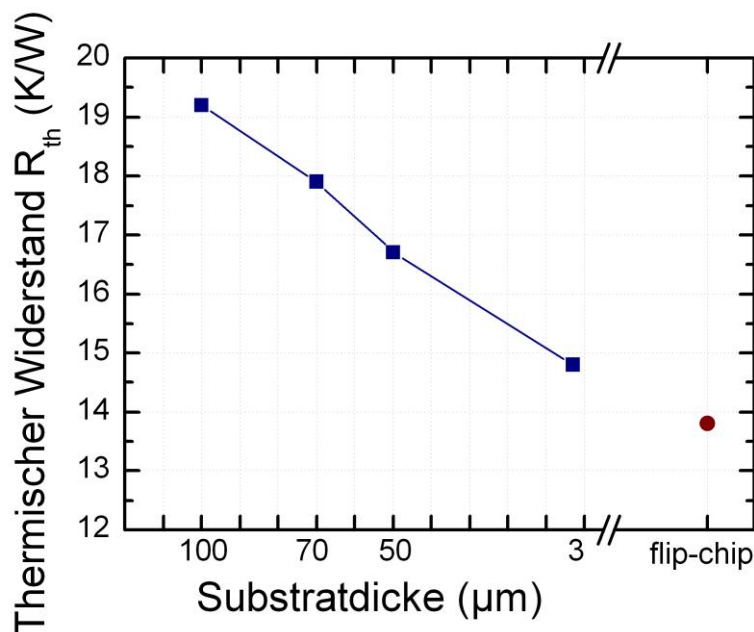


Abbildung 28: Simulation des Einflusses der Substratdicke auf den thermischen Widerstand, von aufgebauten Multifinger-HBTs mit einer Emitterfläche von $4000 \mu\text{m}^2$ [Kurp02].

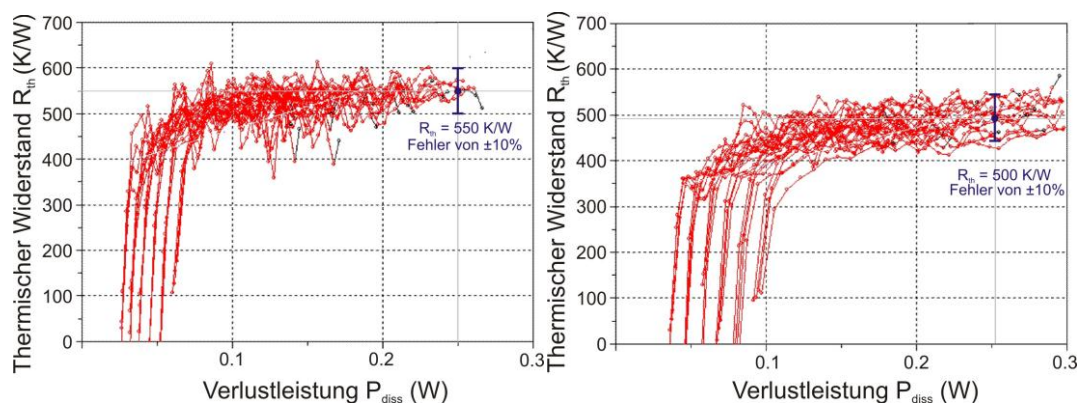


Abbildung 29: Thermischer Widerstand von aufgebauten HBTs von nicht abgedünntem Wafer (links), und von einem auf $100 \mu\text{m}$ abgedünnten Wafer (rechts)

des Transistors dimensioniert werden. Leider ist GaAs aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit von $k_{GaAs} = 55 \text{ W/mK}$ im Vergleich zu Gold mit $k_{Au} = 318 \text{ W/mK}$ für den Wärmetransport aus dem Bauelement schlecht geeignet.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung des thermischen Widerstands des Transistors – neben der Layoutoptimierung – ist das Abdünnen des Substrats. Messungen an GaAs-Leistungs-HBTs (Emitterfläche $E_A = 4000 \mu\text{m}^2$) haben gezeigt, dass sie bei einer Substratdicke von $650 \mu\text{m}$ einen thermischen Widerstand von ca. 29 K/W besitzen. Simulationen von Transistoren mit auf $100 \mu\text{m}$ abgedünnten Substrat zeigen eine Verringerung des thermischen Widerstands auf ca. 19 K/W . Ein weiteres deutliches Abdünnen auf ca. $3 \mu\text{m}$ brächte nur eine Verringerung um 25 % auf ca. 15 K/W [Kurp02] (Abbildung 28). HBT Leistungstransistoren werden daher „flip-chip“ mit der Vorderseite nach unten auf einem speziellen strukturierten Trägersubstrat mit geringem thermischen Widerstand aufgelötet. Das Trägersubstrat besteht meistens aus AlN, da seine Wärmeleitfähigkeit mit $k_{AlN} = 285 \text{ W/mK}$ nur geringfügig niedriger als die von Gold ist. Außerdem weicht der thermische Ausdehnungskoeffizient von AlN ($\alpha_{Therm}^{AlN} = 5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) nur sehr geringfügig von dem von GaAs ($\alpha_{Therm}^{GaAs} = 6,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) ab, wodurch bei Wärmeentwicklung mechanische Spannungen an deren Grenzfläche vermieden werden.

Die HBTs in dieser Arbeit werden bei vergleichsweise niedrigen Verlustleistungen von $P_{Diss} = 220$ bis 250 mW gealtert. Darüberhinaus sind sie mit einer dicken Luftbrücke von ca. $16 \mu\text{m}$ ausgestattet. Hierdurch hat die Substratdicke nur einen geringen Einfluss auf den thermischen Widerstand dieser HBTs. So führt das Abdünnen des Wafers von $650 \mu\text{m}$ auf $100 \mu\text{m}$ zu einer Verringerung des thermischen Widerstandes von ca. 550 K/W um ca. 10 % auf ca. 500 K/W , jeweils bei einer Verlustleistung von $0,25 \text{ W}$ (Abbildung 29).

Wie bereits erwähnt, haben die Luftbrücken einen großen Einfluss auf den thermischen Widerstand der Transistoren. Besonders bei Leistungs-HBTs mit hoher Wärmeentwicklung spielt die Dicke der Luftbrücken eine Rolle. Bei den HBTs mit einem $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ großen Emitterfinger beträgt der thermische Widerstand bei HBTs mit $18 \mu\text{m}$ dicken Luftbrücken ca. 500 W/K . Vergleichbare HBTs mit nur $3 \mu\text{m}$ dicken Luftbrücken besitzen einen 25 % höheren thermischen Widerstand von ca. 625 K/W (Abbildung 30).

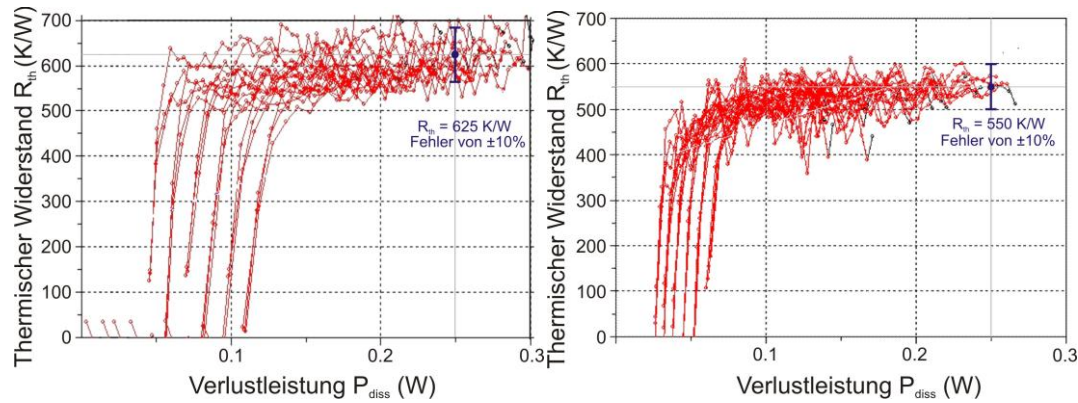


Abbildung 30: Thermischer Widerstand von HBTs mit 3 μm (links) und 16 μm (rechts) dicken Luftbrücken.

IV.1.3. Alterungsbedingungen

Die Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen wurde mit der Motivation durchgeführt, die Entwicklung der GaAs-basierten HBTs zu begleiten und Feedback an die Technologie über die Zuverlässigkeit der Transistoren zu geben. Hierfür mussten die Messungen in kurzer Zeit abgeschlossen werden, um zeitnah Aussagen über die Qualität der Transistoren machen zu können.

Wie bereits in II.2.1 erwähnt, werden Umgebungstemperatur und Stromdichte als Beschleunigungsparameter eingesetzt. Bei der Auswahl der Alterungsbedingungen muss ein Kompromiss zwischen der Beschleunigung der Alterung und der Aussagekraft der Lebensdauerdaten gefunden werden. Die Vergleichbarkeit der Degradationsmechanismen unter normalen Betriebsbedingungen und Bedingungen unter Stress muss gewährleistet werden.

Die untersuchten Transistoren mit einer Emitterfläche von $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ haben ihre maximale Stromverstärkung β bei einer Kollektorstromdichte von ca. $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ (Abbildung 31). Bei dieser Stromdichte besitzen sie auch ihre maximale Grenzfrequenz f_{max} von ca. 200 GHz. Die Kollektorspannung beträgt dabei $U_{\text{CE}} = 3,0 \text{ V}$. Das ist auch die Betriebsspannung für die verschiedenen Anwendungen. Für die Festlegung der Stromdichte während der Alterungsmessungen wurde ein Stufentest durchgeführt. Bei einer Kollektorspannung von $U_{\text{CE}} = 3,0 \text{ V}$ und einer Umgebungstemperatur von $T_A = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde die Kollektorstromdichte stufenweise bis zum Ausfall des Transistors erhöht (Abbildung 32). Die Umgebungstemperatur wurde so ausgewählt, dass der Transistor bei einer Stromdichte von

$J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ eine Junction-Temperatur von ungefähr $T_J = 300 \text{ °C}$ hat. Eine Stromdichte von $J_C = 1,4 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ führt unter diesen Bedingungen in der Regel zum Ausfall des HBT's. Von diesen Werten ausgehend können nun die Bedingungen für die Lebensdaueruntersuchung ausgewählt werden.

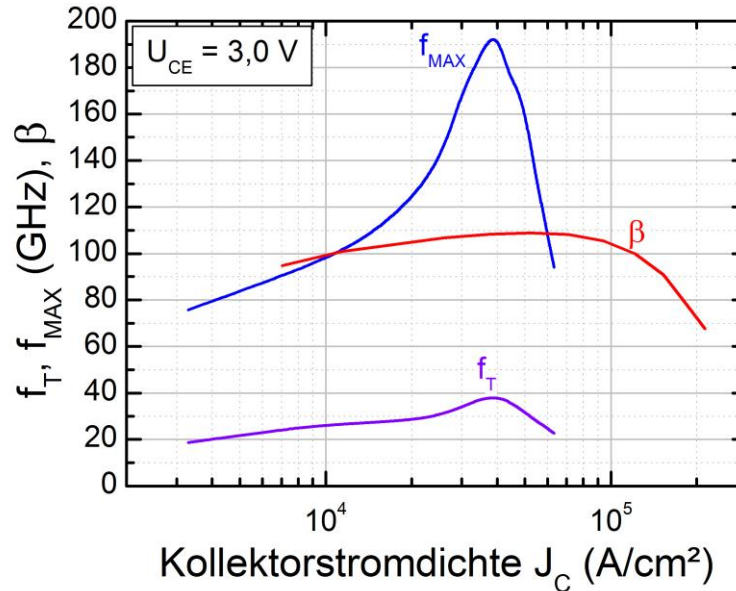


Abbildung 31: Stromverstärkung (β) und Grenzfrequenz (f_T, f_{MAX}) in Abhängigkeit der Kollektorstromdichte (J_C). Die Kollektor-Emitterspannung beträgt $U_{CE} = 3,0 \text{ V}$.

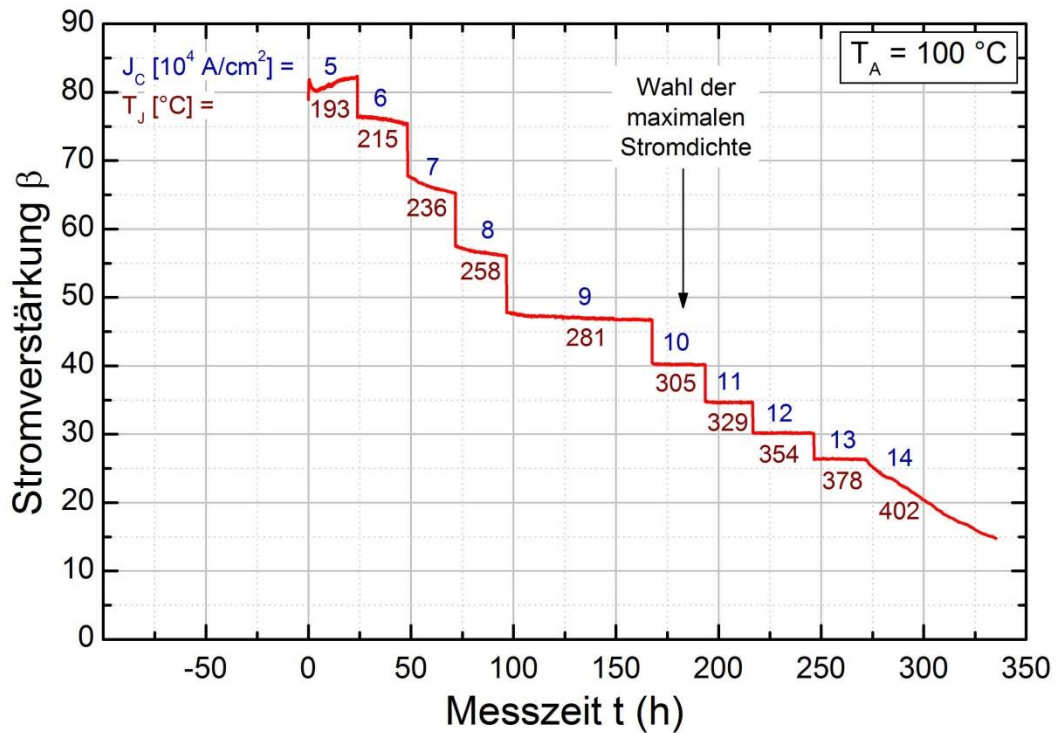


Abbildung 32: Stufen-Test: stufenweise Erhöhung der Kollektorstromdichte von $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ bis zum Ausfall des HBTs zur Bestimmung der maximalen Stromdichte bei einer Umgebungstemperatur von $T_A = 100 \text{ °C}$.

Um die HBTs während der Alterung nicht zu sehr zu belasten und die Aktivierung ungewöhnlicher Degradationsmechanismen zu vermeiden, die im normalen Betrieb womöglich nicht auftreten, wurde die maximale Kollektorstromdichte für Lebensdaueruntersuchungen auf $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ festgelegt. Diese Stromdichte wurde für sogenannte Schnelltests bei einer Junction-Temperatur von $T_J = 300 \text{ °C}$ eingesetzt. Das Ziel dieser Messungen war es, innerhalb weniger Hundert Stunden Ergebnisse zu erhalten. Damit sollten die Transistoren verschiedener Wafer miteinander verglichen werden, um schnell Erkenntnis über deren Qualität zu erhalten.

Die Stromdichte für die Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$ sollte einerseits nicht zu hoch sein, dass dadurch ungewöhnliche Degradationsmechanismen aktiviert werden. Andererseits sollte sie hoch genug sein, damit zum Erreichen hoher Junction-Temperaturen von $T_J = 300$ bis 325 °C nicht allzu hohe Umgebungstemperaturen eingestellt werden müssen. Die Umgebungstemperatur wird durch die Temperaturfestigkeit des Leiterplattenmaterials und der passiven Bauelemente der Schaltung zur Unterdrückung der Transistoroszillation auf 200 °C begrenzt. In Tabelle 3 sind Umgebungstemperaturen aufgetragen, die für Stromdichten $J_C = 6$ bis $10 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ (oberste Zeile) für einen HBT mit einer Emittierfläche von $A_E = 3 \times 30 \text{ } \mu\text{m}^2$ und einem thermischen Widerstand von $R_{Th} = 550 \text{ K/W}$ eingestellt werden müssten, um die gewünschten Junction-Temperaturen T_J (erste Spalte rechts) zu erzielen. Man erkennt, dass eine Junction-Temperatur von 325 °C bei einer Umgebungstemperatur von 192 °C – also knapp unter 200 °C – und bei einer Stromdichte von $8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ erreicht wird.

		Stromdichte $J_C [\times 10^4 \text{ A/cm}^2]$						
		6	7	8	9	10		
Umgebungstemperatur $T_A [\text{°C}]$	126,5	107,8	88,0	66,8	43,8		225	Junction-Temperatur $T_J [\text{°C}]$
	152,1	133,6	114,2	93,6	71,5		250	
	177,5	159,3	140,2	120,2	98,8		275	
	202,9	184,9	166,2	146,5	125,7		300	
	228,3	210,5	192,0	172,6	152,3		325	

Tabelle 3: Umgebungstemperatur T_A in Abhängigkeit der Stromdichte, um die gewünschte Junction-Temperatur T_J einzustellen. Für einen HBT mit einem thermischen Widerstand von $R_{th} = 550 \text{ K/W}$ und bei einer Kollektorspannung von $U_C = 3,0 \text{ V}$

IV.2. Messtechnik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Labor mit Messplätzen speziell für die in dieser Arbeit entwickelten Methoden zur Lebensdaueruntersuchung von Transistoren aufgebaut. In diesem Abschnitt werden die Messplätze und deren Funktionsweise erläutert und die Probleme, die sich bei diesen Untersuchungen ergeben, beschrieben. Die Bestimmung der Lebensdauer von Transistoren erfordert die Untersuchung einer ausreichenden Zahl von Bauelementen, um eine statistisch gesicherte Aussage über die Lebensdauer machen zu können. Wie bereits in II.2.1 erwähnt, wird die Alterung der Transistoren durch Einsatz von höheren Umgebungstemperaturen und höheren Stromdichten beschleunigt. Insbesondere erfordern die hohen Umgebungstemperaturen bis $T_A = 200\text{ °C}$ den Einsatz spezieller Materialien und Komponenten, die bei diesen Temperaturen selbst zuverlässig funktionieren.

Die Alterung der HBTs erfolgte ausschließlich bei konstanter Verlustleistung des Kollektors. Die gewünschte Kollektorspannung von $U_{CE} = 3,0\text{ V}$ wurde angelegt und der Basisstrom so geregelt, dass der gewünschte Kollektorstrom konstant den vorgegebenen Wert einhält, wodurch die Junction-Temperatur, also die Belastung des HBT's, nahezu konstant bleiben. Dies erfordert jedoch eine ständige Überwachung der elektrischen Parameter (Abbildung 33). Das Ziel dieser Methode ist, den Fehler in der Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$ und der Aktivierungsenergie E_A minimal zu halten.

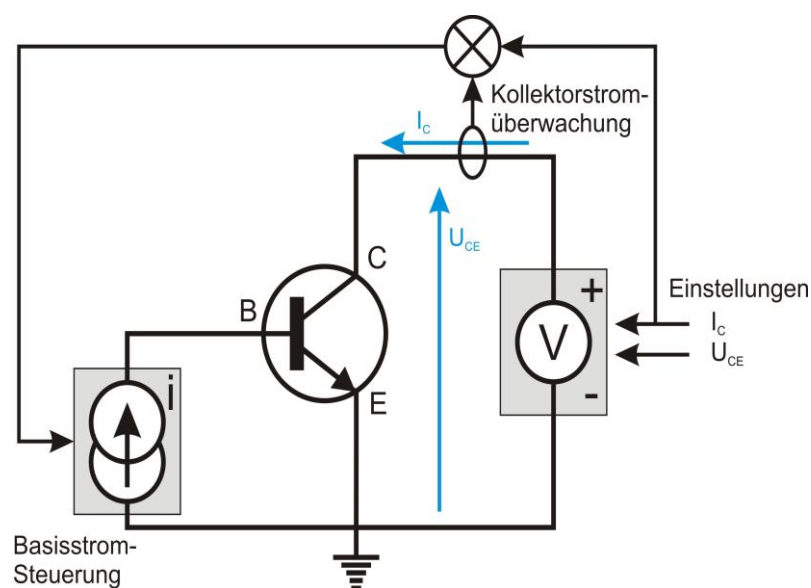


Abbildung 33: Regelkreis für die Alterung der HBTs bei konstanter Ausgangsleistung.

Die Einstellung, Kontrolle und Regelung der Alterungsparameter erfolgte zunächst ausschließlich durch Netzteile (Keithley 2400 Serie), die mit einem selbst entwickelten Programm über einen PC gesteuert wurden. Der Nachteil ist, dass die Alterung von vielen Transistoren durch nur ein Programm zur Überlastung des PC's führen kann und diesen anfällig für Systemabstürze macht. Auch ein Ausfall des PC's kann zur Unterbrechung der Alterung und Datenverlust führen. Daher wurden die Netzteile durch ein speziell für Alterung von Bauelementen entwickeltes Messsystem der französischen Firma iTest ersetzt (Abbildung 34), welches auf die Anforderungen und die Alterungsmethoden in dieser Arbeit angepasst wurde. Ein System (Unit) besteht aus maximal 13 Modulen – ein Modul zur Regelung der Temperatur und 12 Module zur elektrischen Versorgung der Transistoren. Diese Module werden von einem Mikrocontroller überwacht, gesteuert, und die Messdaten werden im lokalen Speicher des Controllers abgelegt. Mit einem speziellen Programm können dann die Einstellungen der Messung an den Controller übertragen und die Messdaten aus seinem lokalen Speicher ausgelesen werden. Auf diese Weise kann ein Ausfall des PC's nicht zum Datenverlust führen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Kontrolle der Alterungsparameter für viele Transistoren auf verschiedene Controller verteilt wird.

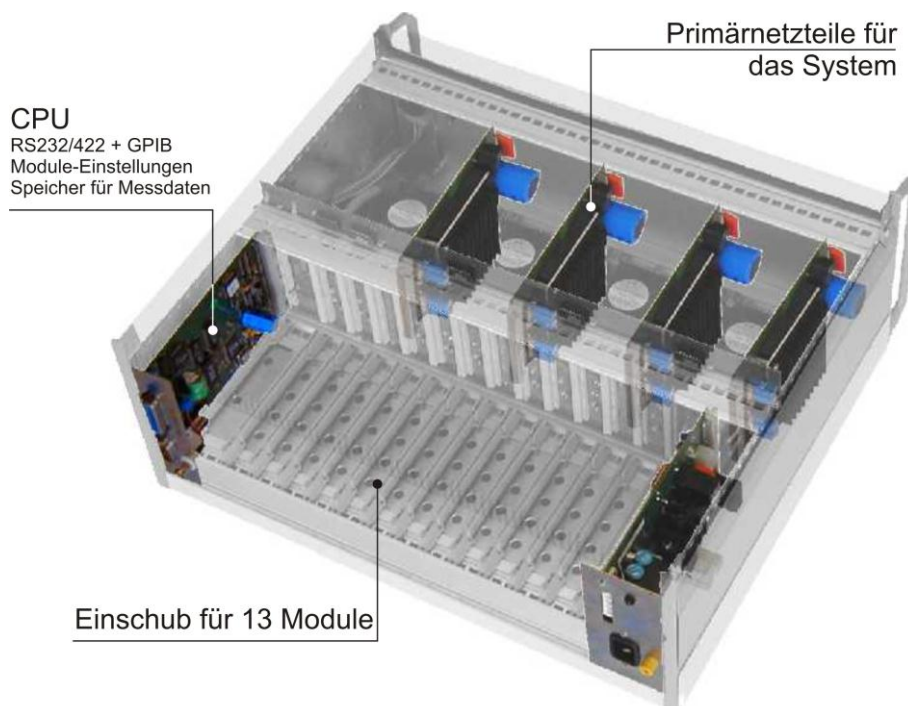


Abbildung 34: Alterungssystem von iTest zur Durchführung der Lebensdauermessungen. Der Mikrocontroller (CPU) überwacht und regelt die Alterungsmessungen und speichert die Daten lokal ab.

Ein Problem der Messtechnik ist die Neigung von Transistoren mit hoher Stromverstärkung ($\beta > 60$) zur Instabilität aufgrund von Rückkopplungen im Transistor und zum Schwingen bei Frequenzen im Bereich von wenigen hundert MHz. Das Schwingen kann den Transistor zerstören, da es hierbei keine Kontrolle mehr über den Arbeitspunkt gibt. Das Schwingen kann aber auch zur sogenannten HF-Kühlung führen. Dabei wird die Gleichstromverlustleistung nicht in Wärme, sondern in ein Hochfrequenzsignal umgesetzt. Es wird also weniger Wärme im Transistor entwickelt, was zur Verringerung der Junction-Temperatur bzw. Belastung des Transistors, und somit höhere Lebensdauer während der Alterung führt.

Um diese Instabilität der Transistoren zu beheben, wurde für aufgebaute HBTs eine spezielle Schaltung entworfen (Abbildung 35), die eine Rückkopplung im Transistor unterbindet bzw. eine Kreisverstärkung kleiner als 1 ermöglicht. Für On-Wafer-Messungen werden aus diesem Grund Koplanarmessspitzen verwendet, die mit Hochfrequenzkabeln angeschlossen werden. Zur Einspeisung der Spannungsversorgung werden Bias-Tees eingesetzt, die aufgrund ihrer Funktionsweise ebenfalls zur Unterdrückung von Oszillationen führen.

Die Alterung von HBTs on-wafer erfolgte an einem Prober mit einem heizbaren Chuck, wobei zum Anlegen von Strom und Spannung die HBTs auf dem fertig prozessierten Wafer mit speziellen Messspitzen angetastet werden (Abbildung 36). Der Chuck kann bis auf 180 °C geheizt werden. Die on-wafer Alterung wurde ausschließlich für die erwähnten Schnelltests ($J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ und $T_J = 300 \text{ °C}$) eingesetzt. Dabei betrugen die Umgebungstemperaturen ca. 150 °C, wofür spezielle Messspitzen aus Wolfram eingesetzt werden mussten.

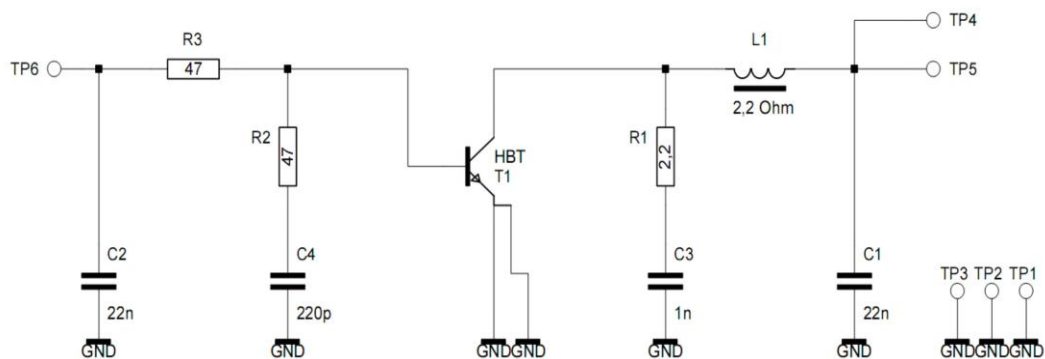


Abbildung 35: Schaltungsnetzwerk zur Unterdrückung von Transistoroszillation für vereinzelte Transistoren.

Für die Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$, wurden die HBTs einzeln aufgebaut und in Öfen gealtert (Abbildung 37). Für diese Messungen wurden drei Öfen in Zusammenarbeit mit iTest entworfen und gebaut, um die Spannungsversorgungseinheiten der HBTs während der Alterung und auch die Öfen gemeinsam in mobilen Racks einzubauen. Es wurden drei kleine Öfen gebaut, in denen jeweils drei Keramikgehäuse – je für zwei HBTs ausgelegt – Platz finden. Die Keramikgehäuse wurden so gewählt, dass sich die HBTs im Betrieb durch die Selbsterwärmung sich nicht zu sehr aufheizen. Bei geschlossenem Ofen und sechs HBTs in Betrieb heizt sich der Ofen maximal auf 40 °C auf.

Die vereinzelt HBTs wurden auf vergoldete Kupferträger gelötet und dann in Keramikgehäuse eingeklebt. Darauf wurde eine Leiterplatte mit der in Abbildung 35 gezeigten Schaltung zur Unterdrückung von Oszillationen geklebt, die an der Position der HBTs entsprechende Löcher besitzt. Die HBTs werden dann mit der Leiterplatte mittels Bonddrähten elektrisch verbunden (Abbildung 37). Das Materi-

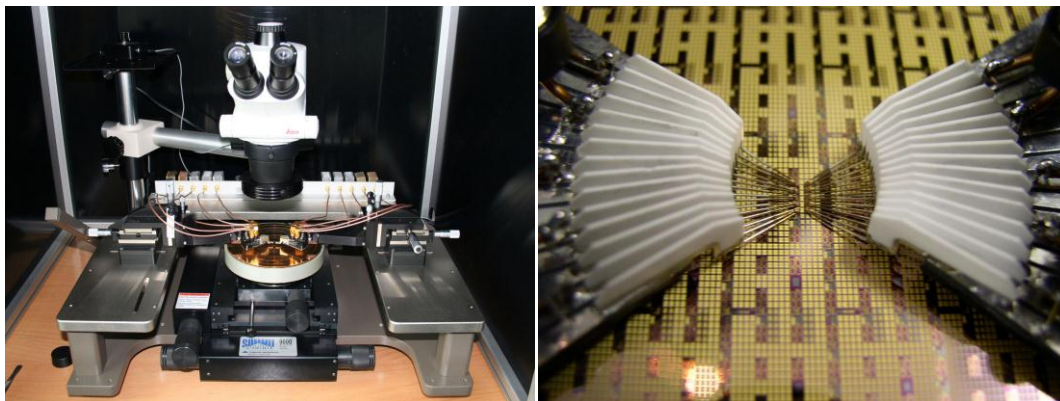


Abbildung 36: Links: Prober mit beheizbarem Chuck und 5-fach Messspitzen für on-wafer Lebensdaueruntersuchung von Transistoren (On-Wafer Alterungsmessplatz), rechts: DC-Messspitzen für 5 Transistoren.

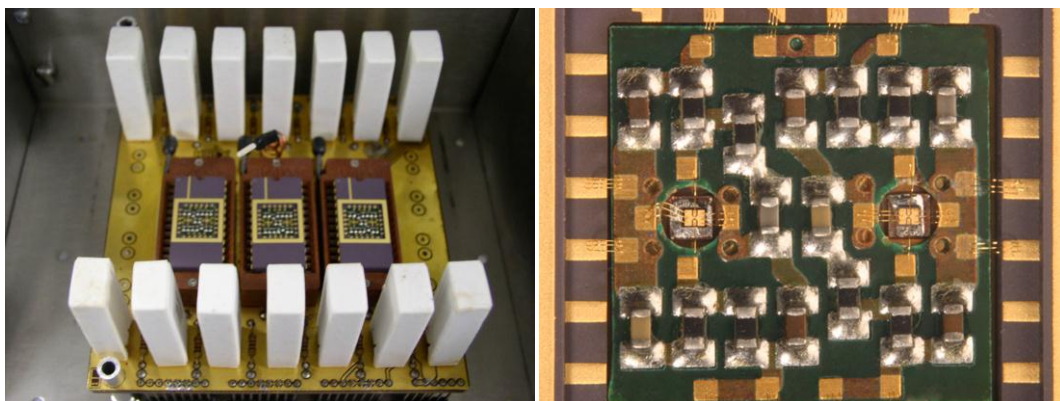


Abbildung 37: Links: Ofen für die Alterung aufgebauter HBTs in Keramikgehäusen für jeweils zwei HBTs, rechts: Leiterplatte mit Netzwerk zur Unterdrückung von Oszillationen, Schaltung siehe Abbildung 35.

al der Leiterplatte und die darauf befindlichen passiven Komponenten mussten so gewählt werden, dass sie eine lang andauernde Belastung durch die Umgebungstemperatur selbst aushalten. So erfordert die Alterung der HBTs bei einer Junction-Temperatur von $T_J = 325\text{ °C}$ und einer Stromdichte von $J_C = 8 \times 10^4\text{ A/cm}^2$ eine Umgebungstemperatur von $T_A = 192\text{ °C}$ (siehe Tabelle 3). Dies bedeutet eine starke Belastung für die Leiterplatte und die darauf befindlichen Komponenten.

Damit sich die Transistoren leichter und präziser aus dem Waferverbund vereinzeln lassen, muss der ca. $650\text{ }\mu\text{m}$ dicke Wafer auf $100\text{ }\mu\text{m}$ abgedünnt werden. Der Aufbau der Transistoren lässt sich allerdings auch mit nicht abgedünnten Wafern durchführen. Untersucht man die Lebensdauern von abgedünnten und nicht abgedünnten HBTs eines Wafers im aufgebauten Zustand, so stellt man fest, dass abgedünnte Transistoren zum Teil nicht nur deutlich früher ausfallen, sondern der Anteil der Frühausfälle – also Transistoren, die sehr schnell nach Inbetriebnahme ausfallen – deutlich größer ist (Abbildung 38). Eine mögliche Erklärung für die kürzere Lebensdauer bei den abgedünnten Wafern ist nicht der Abdünnprozess selbst, sondern es sind mechanische Spannungen, die beim Löten während des Aufbauprozesses auf dem Transistor wirken. Beim Löten werden die Kupferträger, auf die die Transistoren gelötet werden, auf $330\text{--}350\text{ °C}$ (Lötmaterial Gold-Zinn) aufgeheizt. Beim Abkühlen steht dann der Transistor unter mechanischer Spannung, wenn sich der Träger zusammenzieht. Diese Verspannung kann bei nicht abgedünntem Substrat (ca. $650\text{ }\mu\text{m}$) abgefangen werden, ohne dass die aktiven Schichten des Transistors davon betroffen sind. Bei abgedünnten Transistoren ($100\text{ }\mu\text{m}$) jedoch reicht die Verspannung auch in die aktiven Bereiche des Transistors hinein, und führt zur zusätzlichen Belastung und beschleunigt die Alterung. Diese Annahme wurde verifiziert, indem Transistoren zweier Waferbruchstücke desselben Wafers – eines abgedünnt, das andere mit normaler Dicke – unter gleichen Bedingungen mit der On-Wafer-Messtechnik gealtert wurden. Dabei wurde kein messbarer Unterschied in der Lebensdauer festgestellt.

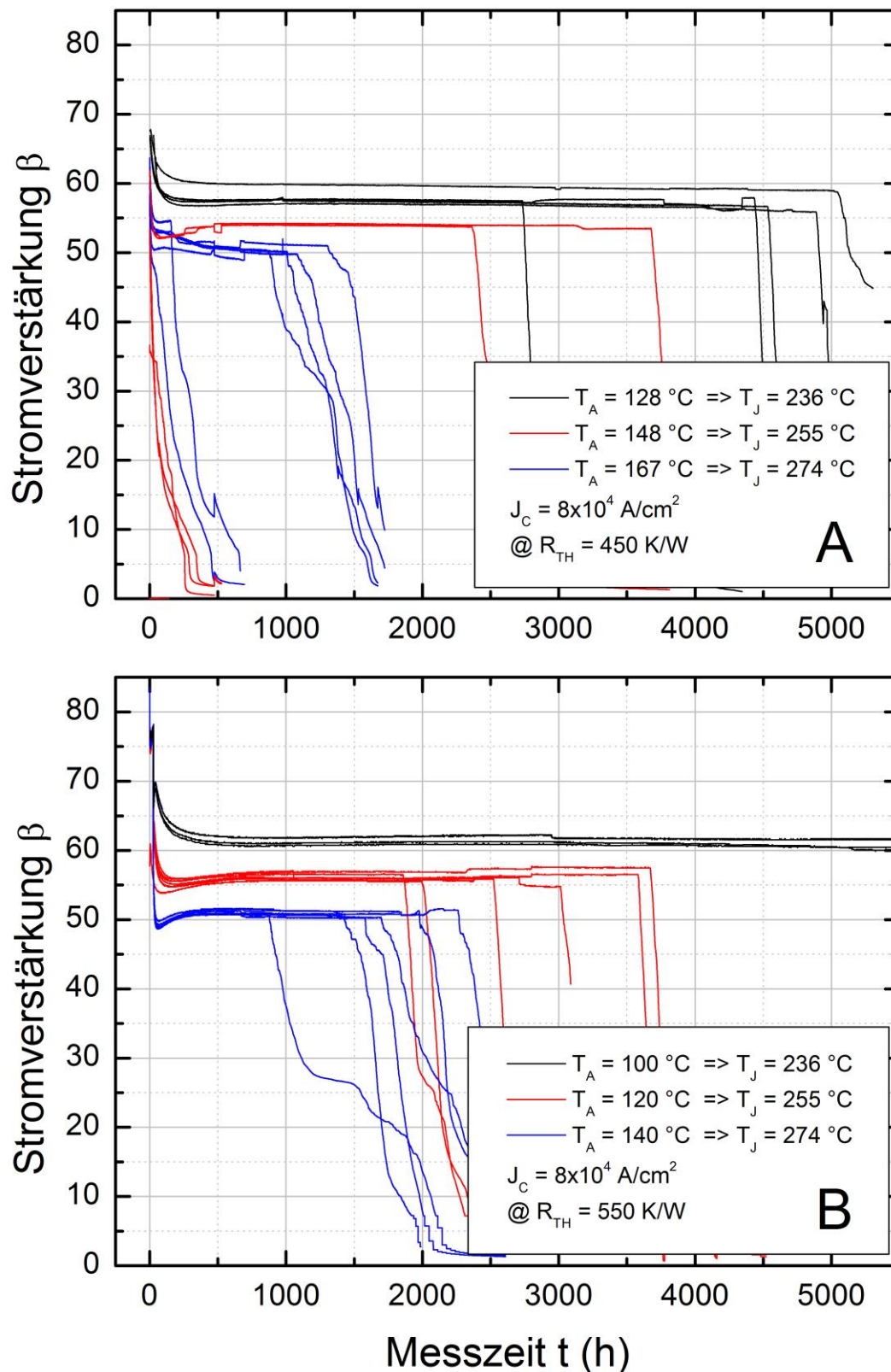


Abbildung 38: Einfluss des Abdünnens auf die Lebensdauer von aufgebauten HBTs. Diagramm A zeigt den Alterungsverlauf von abgedünnten HBTs, Diagramm B zeigt den Verlauf von nicht abgedünnten HBTs des gleichen Wafers. Die Alterung wurde bei gleichen Junction-Temperaturen durchgeführt. Deutliche Unterschiede in Lebensdauer und Anzahl der Frühausfälle sind ersichtlich.

IV.3. Degradationsverlauf

Der Alterungsverlauf eines HBTs wird durch die Auftragung der Stromverstärkung β über der Zeit dargestellt (Abbildung 39). Dieser Verlauf lässt sich in drei Phasen einteilen: Die erste Phase nennt man „Burn-in“ (englisch: einbrennen). Sie ist gekennzeichnet durch die zum Teil starke Änderung der Stromverstärkung in den ersten Stunden des Transistorbetriebs, in denen sowohl eine Zunahme als auch ein Abfall der Stromverstärkung beobachtet werden kann [Bovo00]. Nach der Burn-in-Phase stabilisiert sich die Stromverstärkung und verläuft konstant bzw. fällt leicht ab. In der dritten Phase bricht die Stromverstärkung abrupt zusammen und fällt in sehr kurzer Zeit (~ 100 h) auf einen sehr kleinen (< 10) Wert ab. Daher wird diese Phase als katastrophale Degradation bezeichnet.

Der Zeitpunkt des Ausfalls kann unterschiedlich definiert werden. Überwiegend wird eine Abweichung eines Parameters um einen definierten Betrag von seinem Anfangswert als Ausfall bezeichnet. Da zu Beginn des Betriebes von Transistoren die elektrischen Parameter stark schwanken können, werden sie für kommerzielle Anwendungen vor der Auslieferung einem Burn-in unterzogen, damit dies während des Betriebs beim Kunden nicht mehr auftritt. Dadurch lassen sich Bau-

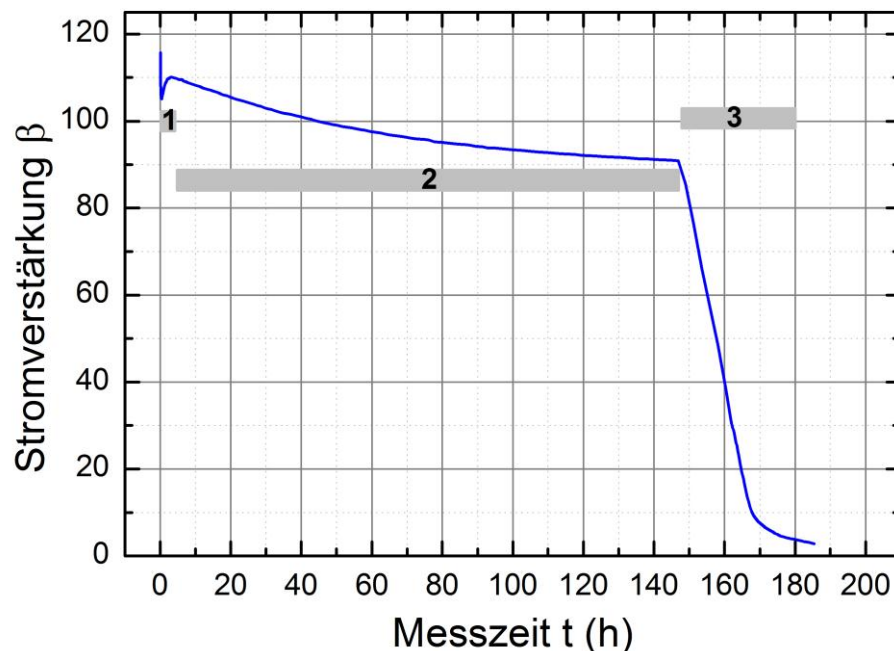


Abbildung 39: Degradationsverlauf eines GaAs HBTs und seine Phasen. **Phase 1:** Burn-in – Änderung der Stromverstärkung in den ersten Betriebsstunden, **Phase 2:** Graduelle Degradation – Leichter Abfall oder auch konstanter Verlauf der Stromverstärkung während der Alterung, **Phase 3:** Katastrophale Degradation – Rapider Abfall der Stromverstärkung, Ausfall des HBTs

elemente mit Produktionsfehler aussortieren und die Ausfallrate in den ersten Betriebsstunden deutlich verringern (siehe dazu II.1.5 und II.2.2). In dieser Arbeit ist die Ausfallbedingung als eine Änderung von 20 % der Stromverstärkung nach dem Burn-in definiert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Mechanismen diskutiert, die während der Burn-in-Phase zur Änderung der Stromverstärkung führen und danach werden das Langzeitverhalten der Transistoren und die katastrophale Degradation diskutiert.

IV.3.1. Kurzzeitdegradation: Burn-in

Die erste Phase der Alterung von GaAs-basierten HBTs ist gekennzeichnet durch Schwankungen in der Stromverstärkung (Abbildung 39). In diesem als Burn-in bezeichneten Zeitraum ist sowohl ein Abfall als auch eine Zunahme der Stromverstärkung zu beobachten. Dieser Prozess tritt nur bei frisch prozessierten HBTs auf und ist irreversibel.

In der Literatur wurden bisher verschiedene Abläufe des Burn-ins beobachtet. Zum Teil wurde ein Abfall mit nachfolgender Stabilisierung der Stromverstärkung beobachtet [Brun03]. Henderson berichtete als einziger bisher von zunächst steigender und dann stabilisierender Stromverstärkung [Hend96]. Borgarino beobachtete zunächst einen Anstieg und dann einen Abfall der Stromverstärkung [Borg99]. Ueda wiederum untersuchte die Änderung der Einsatzspannung U_{on} (vgl. II.3.1) während der Alterung [Ueda96]. Ein Vergleich der verschiedenen Ergebnisse ist aufgrund der unterschiedlichen Technologien und Messbedingungen sehr schwierig. Auch die Interpretationen der Ergebnisse sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar.

Der Burn-in-Prozess wird in der Literatur einheitlich der Wasserstoff-Kontamination der Basisschicht angelastet. Diese Kontamination erfolgt während der Wachstumsphase der nach der Basis folgenden Schichten [Brun02, Kozu93] in der Epitaxieanlage. In der hoch kohlenstoff-dotierten Basis kann der Wasserstoff in drei Zuständen gefunden werden [Liu98]:

1. Der Wasserstoff kann mit dem Kohlenstoff in der Basis elektrisch neutrale Kohlenstoff-Wasserstoff-Komplexe (C-H) bilden [Rahb93].

2. Der Wasserstoff kann, isoliert vom Kohlenstoff, in Form von H^+ , als Donator wirkt und die C-Akzeptoren kompensieren [Fush94].
3. Wasserstoff-Atome können als Verunreinigung im GaAs-Gitter tiefe Störstellen bilden und als Rekombinationszentren fungieren [Chi97].

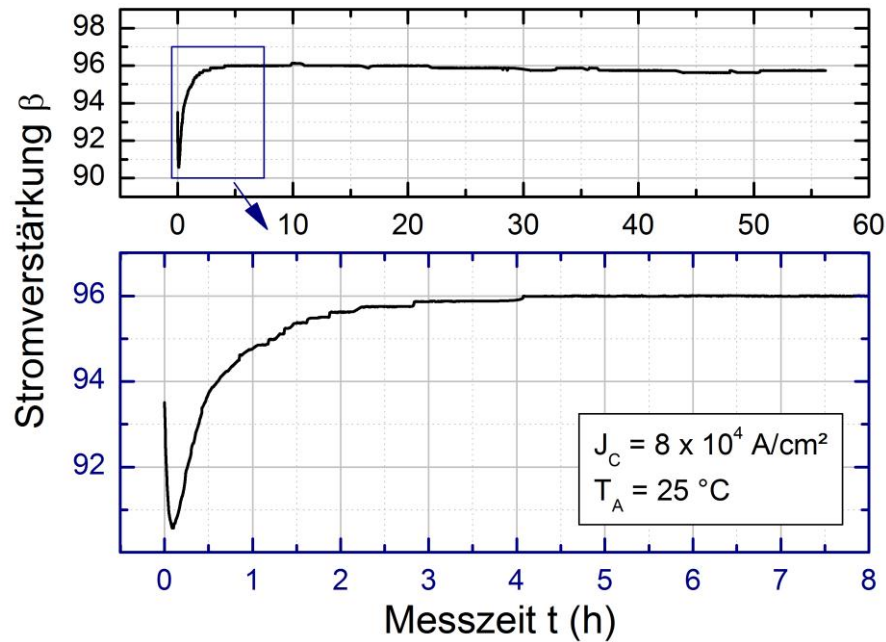


Abbildung 40: Typischer Verlauf des Burn-ins bei GaAs HBTs. (Das untere Diagramm ist die Vergrößerung des markierten Bereichs im oberen Diagramm.)

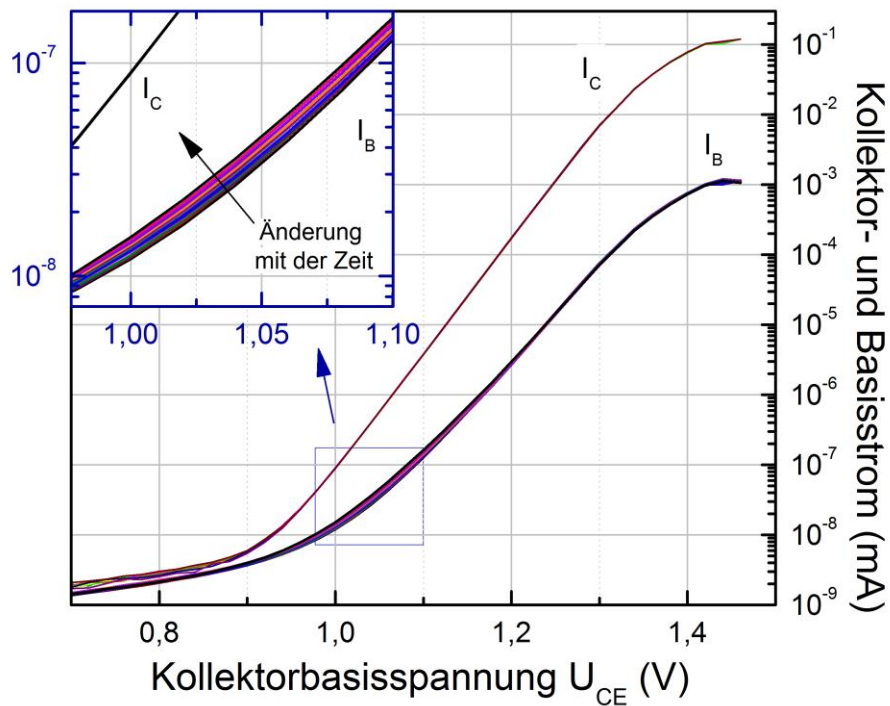


Abbildung 41: Gummel-Plot während des Burn-ins zeigt Änderungen des Basisstroms. Dies ist ein Hinweis, dass der Burn-in mit Änderungen in der Basisschicht zusammenhängt.

Während in den beiden ersten Fällen die aktive Basisdotierungshöhe verringert wird [Bahl95] [Ren95], können im letzteren Fall die Störstellen als Rekombinationszentren wirken und zur Entstehung und Ausbreitung von Versetzungen führen.

In Abbildung 40 ist ein typischer Burn-in-Verlauf eines GaAs-HBTs zu sehen, der am FBH hergestellt wurde. Auffällig ist, dass die Stromverstärkung zunächst stark abfällt, bis sie ein Minimum erreicht, um dann exponentiell anzusteigen und danach einen nahezu konstanten Wert anzunehmen. Dieser Prozess ist nach ca. 30 Minuten bis zwei Stunden abgeschlossen – abhängig von der angelegten Kollektorstromdichte J_C und der Umgebungstemperatur T_A . Danach geht die Alterung in die Phase der graduellen Degradation über und die Stromverstärkung beginnt zu sinken. Während des Burn-ins nimmt der Idealitätsfaktor n_{EB} der Emitter-Basis-Diode leicht zu (Abbildung 41). Dieser Verlauf deutet auf zwei Mechanismen, die beide mit dem Wasserstoff in der Basis zusammenhängen. Nach dem Einschalten des HBTs werden zunächst unter Injektion von Elektronen vom Emitter in die Basis durch die Dissoziation von C-H-Komplexen H^+ -Ionen produziert [Fush95]. Dies führt zur Aktivierung der Kohlenstoffakzeptoren in der Basis bei gleichzeitiger Erhöhung der Basisdotierungshöhe, infolgedessen sinkt die Stromverstärkung [Bahl95] [Yeat02]. Der danach folgende Anstieg der Stromverstärkung deutet auf eine Verringerung des Rekombinationsstroms in der Basis hin. Hierfür kann es mehrere Gründe geben: Die freigesetzten H^+ -Ionen diffundieren zur Emitter-Basis-Grenzfläche oder zur extrinsischen Basisoberfläche [Lee08] und passivieren dort die Defekte. Beide Mechanismen verringern den Anteil an Rekombinationsströmen des Basisstroms und führen zum Ansteigen der Stromverstärkung [Joyc75].

IV.3.1.1. Elektrische und thermische Einflüsse auf den Burn-in-Verlauf

Um den Mechanismus während des Burn-ins besser verstehen und erklären zu können, wurden on-wafer Lebensdauertests von einigen wenigen Stunden mit jeweils fünf HBTs durchgeführt. Im ersten Test wurden die neuen unbenutzten Transistoren bei Raumtemperatur und bei unterschiedlichen Kollektorströmen von 54, 63, 72, 81 und 90 mA gealtert. Diese Werte entsprechen bei den untersuchten HBTs mit einer Emitterfläche von $3 \times 30 \mu m^2$ Stromdichten von 6, 7, 8, 9 und $10 \times 10^4 A/cm^2$ (Abbildung 42). Im zweiten Test wurde die Temperaturabhängigkeit

untersucht. Es wurden fünf unbenutzte Transistoren bei einem Kollektorstrom von 72 mA (Kollektorstromdichte von 8×10^4 A/cm²) bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen von 40, 50, 60, 70 und 80 °C untersucht (Abbildung 43).

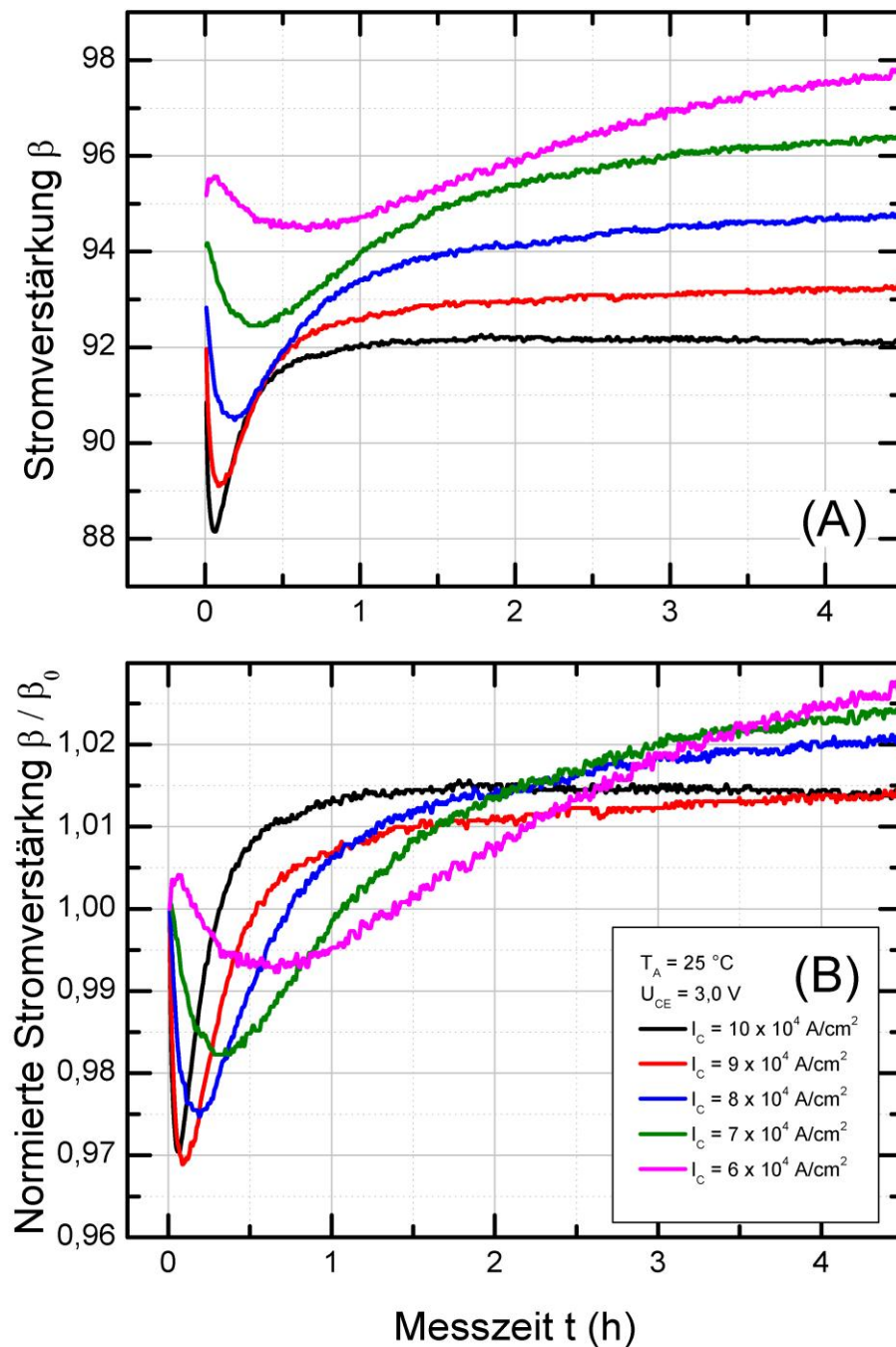


Abbildung 42: Burn-in-Verlauf bei Raumtemperatur und bei verschiedenen Kollektorstromdichten. (A) Es ist deutlich zu erkennen, dass der Burn-in-Prozess durch die erhöhte Stromdichte beschleunigt wird. (B) Verlauf der normierten Stromverstärkung zur Verdeutlichung der Ablaufgeschwindigkeit des Burn-ins. Die Stromverstärkung wurde auf ihren Anfangswert normiert.

In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die Stromdichte den stärksten Einfluss auf die Burn-in-Mechanismen hat. So läuft das Burn-in mit steigender Stromdichte schneller ab, was ein Hinweis darauf ist, dass die Aktivierung der Kohlenstoffakzeptoren durch Dissoziation der C-H-Komplexe von der Elektroneninjektion abhängt.

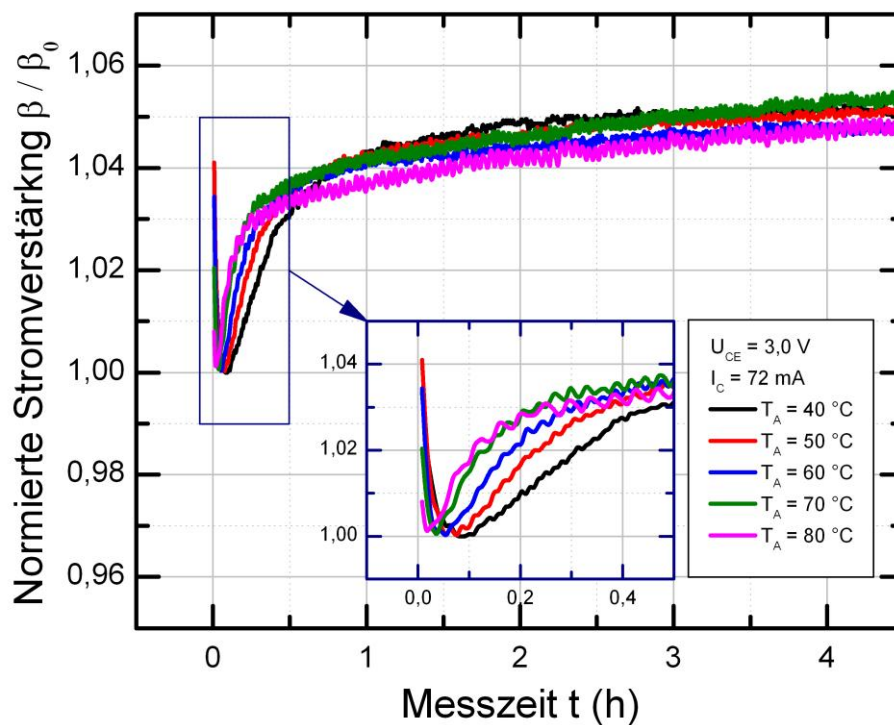


Abbildung 43: Burn-in-Verlauf in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die Stromdichte liegt bei $8 \times 10^4 \text{ A/cm}$, die Kollektorspannung liegt bei $U_{CE} = 3 \text{ V}$. Im unteren Diagramm ist der Burn-in-Verlauf in Abhängigkeit von der Temperatur normiert auf das Minimum der Stromverstärkung dargestellt. Die Temperatur hat keinen Einfluss auf die Verlaufsform des Burn-ins, beschleunigt jedoch den Ablauf leicht.

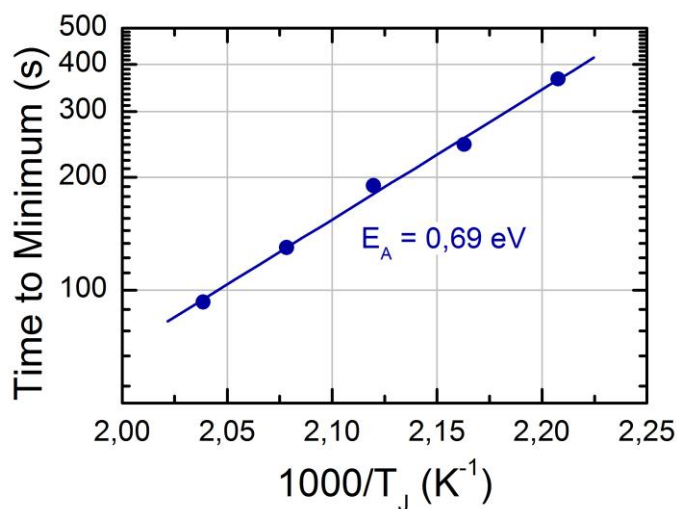


Abbildung 44: Bestimmung der Aktivierungsenergie des Burn-in-Prozesses. Die Stromdichte beträgt $J_C = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$

Betrachtet man die Messungen bei steigender Temperatur (Abbildung 43), so erkennt man, dass die Temperatur kaum Einfluss auf die Form der Burn-in-Kurve hat, jedoch den Ablauf des Burn-ins bis zum Erreichen des Minimums leicht beschleunigt (Abbildung 43, unten). Aus diesen Diagrammen lässt sich die Aktivierungsenergie des Burn-in-Prozesses bestimmen. Hierfür wird die Zeit bis zum Erreichen des Minimums der Stromdichte in Abhängigkeit der Junction-Temperatur im Arrhenius-Diagramm aufgetragen (Abbildung 44). Aus der Steigung des linearen Fits lässt sich dann die Aktivierungsenergie bestimmen. Sie beträgt in diesem Fall $E_A = 0,65$ eV. Bovolon bestimmte für kleinere GaAs HBTs ($A_E = 2 \times 6 \mu\text{m}^2$) bei niedrigerer Stromdichte ($5,6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$) eine Aktivierungsenergie von $E_A = 0,45$ eV [Bovo00]. Der Unterschied dürfte sicherlich an der höheren Basisdotierung von $4,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bei Bovolon gegenüber einer Dotierungshöhe von $3,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bei den in dieser Arbeit untersuchten HBTs liegen.

IV.3.1.2. Burn-in-Prozess in Abhängigkeit der Basisdotierung

Die Untersuchung des Burn-in-Verlaufs bei Bauelementen mit unterschiedlichen Basisdotierungshöhen von $3,3$ bzw. $4,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ zeigt, dass bei Transistoren mit niedrigerer Basisdotierungshöhe das Burn-in schneller abläuft (Abbildung 45).

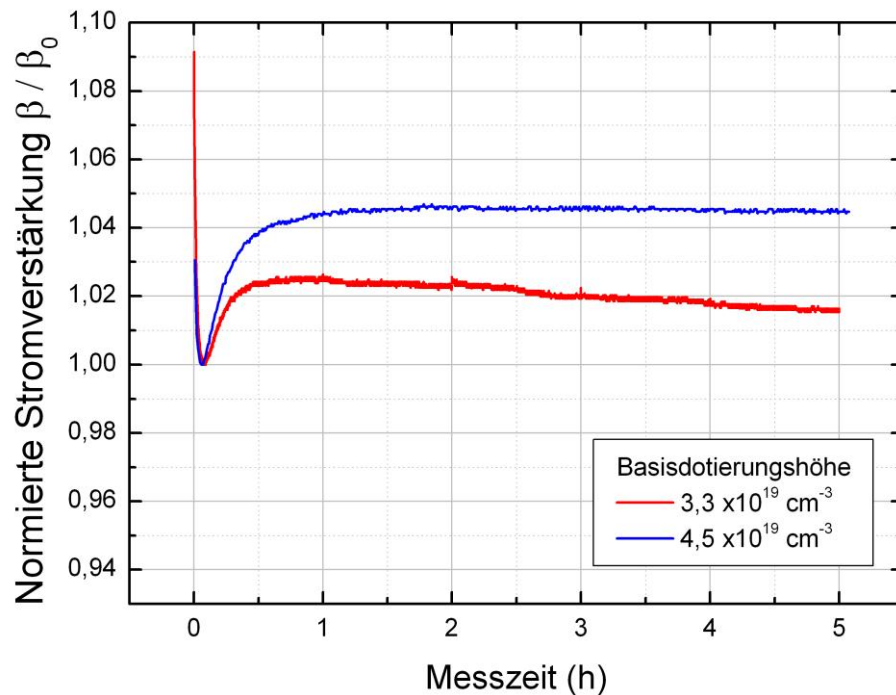


Abbildung 45: Burn-in-Verlauf von HBTs mit unterschiedlichen Basisdotierungshöhen. Beide HBTs wurden bei einer Stromdichte von $1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ und einer Umgebungstemperatur von 25°C

Eine niedrigere Kohlenstoffdotierung hat neben einer geringeren Passivierung durch den Wasserstoff in der Basis auch eine abnehmende tensile Gitterverspannung zur Folge [Brun02]. Der daraus resultierende Defektstatus hat jedoch auf die hier untersuchte Kurzzeitdegradation keinen Einfluss, kann jedoch die Lebensdauer des Bauelements beeinflussen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Annahme, dass die beobachtete Kurzzeit-Degradation – also das Burn-in – durch die strominduzierte Aktivierung wasserstoffpassivierter Kohlenstoffatome verursacht wird.

IV.3.2. Graduelle und katastrophale Degradation

Nach der Burn-in-Phase geht der Alterungsverlauf in die Phase der graduellen Degradation über. Diese Phase ist gekennzeichnet von einem konstanten oder leicht abfallenden Verlauf der Stromverstärkung. Der Verlauf hängt vom Arbeitspunkt während der Alterung ab [Yeat08]. Bei Betriebsspannungen nahe der Basis-Kollektor-Durchbruchspannung ist die graduelle Degradation so stark, dass das Absinken der Stromverstärkung um 20% bereits vor der katastrophalen Degradation eintritt [Yeat08]. Nach der graduellen Degradation folgt die katastrophale Degradation, die durch den abrupten Abfall der Stromverstärkung gekennzeichnet ist.

Während der graduellen Degradation erfolgt in den Bauelementen eine Generation von Punktdefekten, Punktdefektclustern und Microloops [Hend96]. Die Geschwindigkeit ihrer Entstehung und Ausbreitung wirkt sich direkt auf den Abfall der Stromverstärkung aus. Auch die katastrophale Degradation ist eine Folge dieses Mechanismus. Während die Punktdefekte als Rekombinationszentren wirken und zur Generation weiterer Defekte und zur Ausbreitung vorhandener Versetzungen führen (REDR), kommt es zu einem rapiden Anstieg des Rekombinationsstroms. Durch diesen Leckstrom nimmt die Stromverstärkung rapide ab.

IV.4. Einfluss der Technologieparameter auf die HBT-Zuverlässigkeit

Während der Entwicklung eines Prozesses zur Herstellung von Halbleiterbauelementen werden diverse Parameter variiert, welche nicht nur die elektrischen Eigenschaften ändern, sondern auch Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Bauelemente haben. In der Herstellung von GaAs-basierten HBTs spielen nicht nur die Qualität der gewachsenen Epitaxieschichten und deren Zusammensetzung – beispielsweise die Höhe der Basisdotierung oder der Indiumgehalt des Emitters – eine Rolle, sondern auch die darauf folgende Prozessierung der Wafer, insbesondere deren Reproduzierbarkeit. Aber auch die Qualität der Ausgangsmaterialien, insbesondere die Substratqualität spielt eine Rolle.

IV.4.1. Substratmaterial

Für die Zuverlässigkeit der Transistoren spielen Defekte im aktiven Bereich eine große Rolle. Sie fungieren als Rekombinationszentren und die frei gewordene Energie kann wiederum zur Entstehung neuer Defekte und deren Wachstum und Bewegung im Transistor führen. Dieser als rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR) bekannte Mechanismus (vgl. IV.3.1.2) ist seit Langem bei optoelektronischen Bauelementen bekannt [Ueda99]. Dabei spielt die Qualität – im Wesentlichen die Versetzungsdichte – des Substratmaterials eine Rolle. Durch Einsatz von Substraten mit verringerter Versetzungsdichte, wie z. B. VGF¹- oder VB²-Material konnte die Ausbeute und Lebensdauer von Laserdioden und LEDs erheblich verbessert werden [Hend99]. Für elektronische Anwendungen jedoch wird ein Großteil des eingesetzten semi-isolierenden (SI-) Substratmaterials mit der LEC³-Methode hergestellt. Dieses Material besitzt eine ca. 25- bis 50-fach höhere Versetzungsdichte (Tabelle 4) [Rudo99]. Es fällt aber auch auf, dass Wafer von gleichem Substratmaterial aber unterschiedlichem Durchmesser sich in der Versetzungsdichte um einen Faktor 2 bis 3 unterscheiden (Tabelle 4).

Um die Zuverlässigkeit der Bauelemente zu erhöhen, ist es daher geboten, die

¹ VGF: *englisch*, „Vertical Gradient Freeze“,

² VB: *englisch*, „Vertical Bridgman“

³ LEC: *englisch*, „Liquid Encapsulated Czochralski“

Zahl der Defekte bzw. die Defektdichte im Bauelement so gering wie möglich zu halten. Ist die Epitaxie soweit ausgereift, dass während des Schichtwachstums keine weiteren Defekte erzeugt werden, bestimmt die Qualität des Substratmaterials die Defektdichte in der aktiven Zone des Bauelements. Darüber hinaus haben epitaxie-basierte Bauelemente gegenüber Implantationsbauelementen den Vorteil, dass durch Wachstum spezieller Pufferschichten auf dem Substrat die Defektfortpflanzung in die Epitaxieschichten verringert werden kann [Brun02].

Im Folgenden werden die beiden Substrattypen LEC und VGF im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Lebensdauer untersucht. Die Qualität des Substrats hinsichtlich Versetzungen wird vom Hersteller über die *etch pit density* (EPD¹) angegeben. Dafür wird die Waferoberfläche mit Kaliumhydroxid (KOH) bei 450 °C geätzt. Die Ätzrate ist an Versetzungen höher und führt zur Entstehung von Vertiefungen, die dann unter dem Mikroskop gezählt werden. Daraus wird die Versetzungsdichte bestimmt. Dieses Verfahren ist nach DIN 50454-1 standardisiert. Die Versetzungsdichte kann auch mit Beugungsmethoden wie hochauflösende Röntgendiffraktometrie (HRXRD²) bestimmt werden. Dabei wird die Änderung der Halbwertsbreite der Rockingkurve zur Höhe der Versetzungsdichte korreliert.

In Abbildung 46 sind die Ergebnisse der hochauflösenden Röntgenbeugungsmessungen an zwei 4-Zoll GaAs-Substraten – einem VGF- (links) und einem LEC-Wafer (rechts) – dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das VGF-Substrat im Vergleich zum LEC-Substrat sowohl eine geringere Versetzungsdichte besitzt, als auch eine homogenere Versetzungsverteilung. Beim LEC-Substrat sind Strukturen zu erkennen, wo die Versetzungsdichte deutlich höher ist als in der Um-

Tabelle 4: Angaben des Substratherstellers Freiberger für die Versetzungsdichte (EPD) von 3 und 4-Zoll LEC- und VGF-GaAs-Wafer.

	Waferdurchmesser (Zoll)	Versetzungsdichte (EPD, cm ⁻²)
VGF	3	1500
	4	5000
LEC	3	70000
	4	150000

¹ EPD: *englisch*, „Etc Pit Density“, *deutsch* „Ätzgrübchendichte“

² HRXRD: *englisch*, „High Resolution X-Ray Diffraction“

gebung. Im Histogramm ist die Verteilung der Halbwertsbreiten aufgetragen (Abbildung 47). Die Verteilung ist beim VGF-Substrat deutlich schmäler und das Maximum liegt bei niedrigeren Halbwertsbreiten. Die Verteilung beim LEC-Substrat ist deutlich breiter, was für eine inhomogenere Verteilung der Versetzungsdichte über dem Wafer spricht. Ebenso liegt das Maximum der Verteilung bei höheren Halbwertsbreiten, was ein Zeichen für die höhere Versetzungsdichte ist.

Die Untersuchung des Einflusses der Substratqualität auf die Lebensdauer bedarf einer großen Zahl von Messungen, um diesen Einfluss statistisch zu unter-

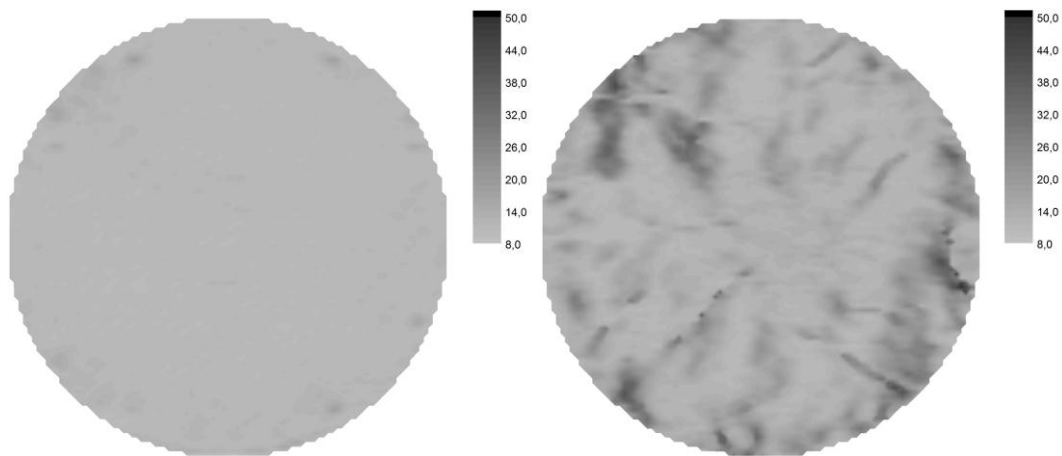


Abbildung 46: HRXRD-Map von VGF (links) und LEC (rechts) GaAs-Substrate. Zu sehen ist die Verteilung der Halbwertsbreite der Rocking-Kurve. Niedrige Werte (hell) gehören zu einer geringen Halbwertsbreite des Signals, also einer geringeren Versetzungsdichte, höhere Werte repräsentieren entsprechend Bereiche mit höherer Versetzungsdichte.

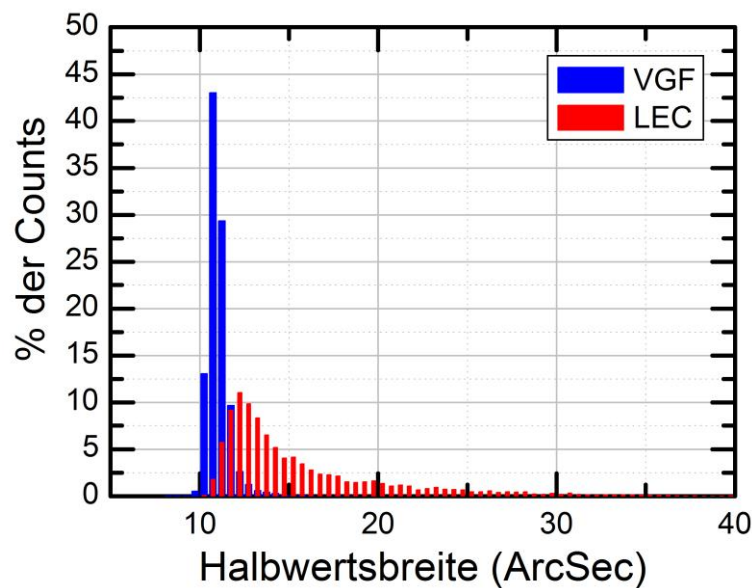


Abbildung 47: Histogramm: Verteilung der Versetzungsdichtenanteile von VGF- (blau) und LEC-Substrate (grün). Deutlich zu erkennen ist, dass das VGF-Substrat eine geringe und homogene Verteilung der Versetzungsdichte besitzt, während das LEC-Substrat eine deutliche höhere mittlere Versetzungsdichte besitzt.

mauern. Dies lässt sich mit einigen Vorüberlegungen zeigen: Für die Zuverlässigkeit der Transistoren sind Versetzungen und Defekte wichtig, die sich beim Wachstum der Epitaxieschichten vom Substrat in die aktiven Schichten des Transistors fortpflanzen. Da sie nur im aktiven Bereich des Transistors Einfluss auf dessen Lebensdauer haben, kann man mit einer einfachen Rechnung die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Defekts in einem Transistor für ein bestimmtes Substratmaterial bestimmen. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht dem Produkt der vom Hersteller angegebenen Versetzungsdichte des Substrats und der Größe der aktiven Fläche des Transistors (Emitterfläche). In Tabelle 6 sind die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Versetzungen im Emitter von HBTs mit einer Emitterfläche von $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ für den beiden Substrattypen VGF und LEC berechnet worden. Für Transistoren auf LEC-Wafern beträgt die Wahrscheinlichkeit 1:0,135, also etwa ein Defekt auf 7,4 Transistoren. Für Transistoren auf VGF-Wafern ist die Wahrscheinlichkeit 30-fach niedriger. Dort kommt ein Defekt auf 222,2 Transistoren. Diese Berechnung zeigt, dass zum Nachweis des Einflusses der Substratqualität auf die Lebensdauer sehr viele Transistoren untersucht werden müssen.

Im Folgenden werden Lebensdaueruntersuchungen von Transistoren vorgestellt, die auf unterschiedlichen Substrattypen gewachsen wurden. Epitaxie und Prozess waren für die betrachteten HBTs gleich.

In Abbildung 48 sind Alterungsdaten von jeweils drei HBTs auf 3-Zoll LEC- und VGF-Wafer mit identischen Epitaxie-Schichten dargestellt. Es sind keine Unterschiede im Langzeitverhalten der HBTs zu erkennen. Auch ein Vergleich der Zuverlässigkeit von Transistoren auf 4-Zoll LEC- und VGF-Wafern zeigt keinen Unterschied im Langzeitverhalten der Lebensdauern (Abbildung 49). Hier wurden die HBTs vereinzelt aufgebaut. Es fällt jedoch auf, dass die Zahl der Frühausfälle beim LEC-Wafer sehr hoch ist.

Tabelle 5: Durchschnittliche Zahl von Versetzungen pro HBT mit einer Emitterfläche von $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ auf einem 4“-Wafer.

	Versetzungsdichte (EPD, cm^{-2})	Anzahl Versetzungen pro $3 \times 30 \mu\text{m}^2$ HBT
VGF	5000	0,0045
LEC	150000	0,135

Die bisher durchgeführten Messungen konnten den Einfluss der Versetzungsdichten auf die Lebensdauer nicht nachweisen und lassen auf eine gute und reproduzierbare Technologie schließen.

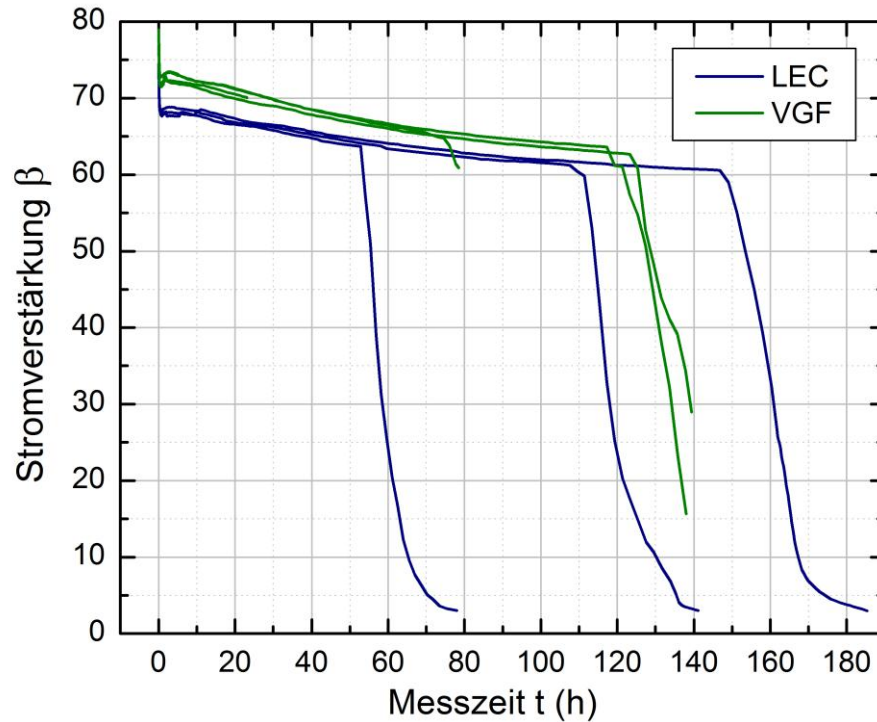


Abbildung 48: On-wafer Lebensdauerermessungen von HBTs auf 3-Zoll LEC- und VGF-Wafer. Die Alterung wurde bei $T_A = 150\text{ °C}$ und $J_C = 1 \times 10^5\text{ A/cm}^2$ durchgeführt.

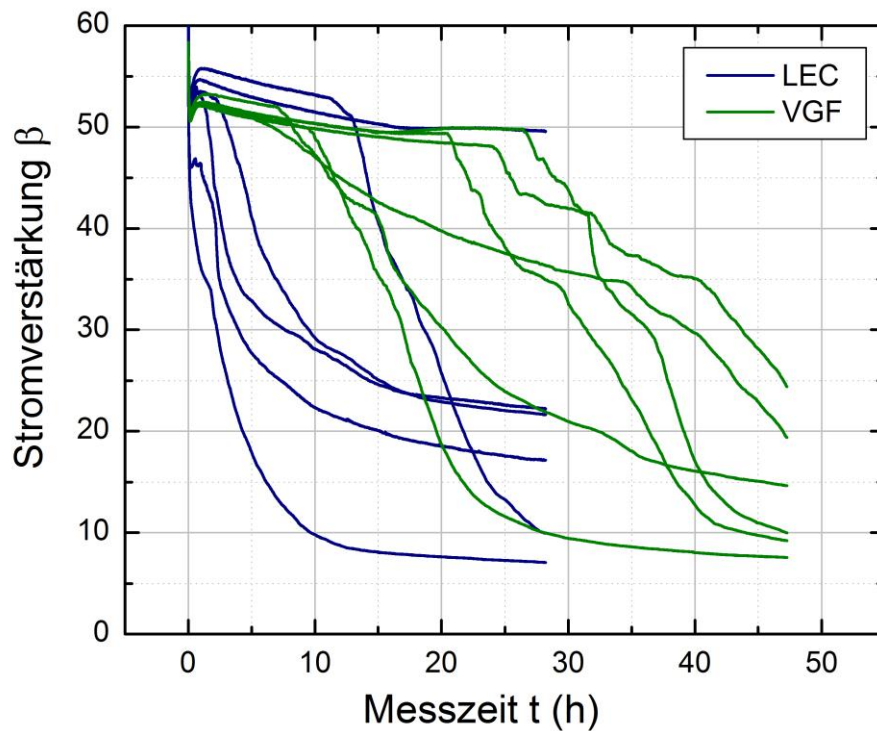


Abbildung 49: Lebensdauerdaten von aufgebauten HBTs von 4-Zoll LEC- und VGF-Wafern. Die Messungen erfolgten bei $U_{CE} = 3,0\text{ V}$, $J_C = 1 \times 10^5\text{ A/cm}^2$ und $T_A = 150\text{ °C}$.

Die in der Tabelle 6 angegebenen Versetzungsdichten für die jeweiligen Substrattypen sind Durchschnittswerte. Daher wurden im Folgenden Transistoren von versetzungsarmen und versetzungsreichen Bereichen der LEC-Wafer verglichen.

Um genauere Aussagen über den Einfluss der Versetzungsdichten auf die Lebensdauer der Transistoren machen zu können, wurden von zwei Wafern zunächst

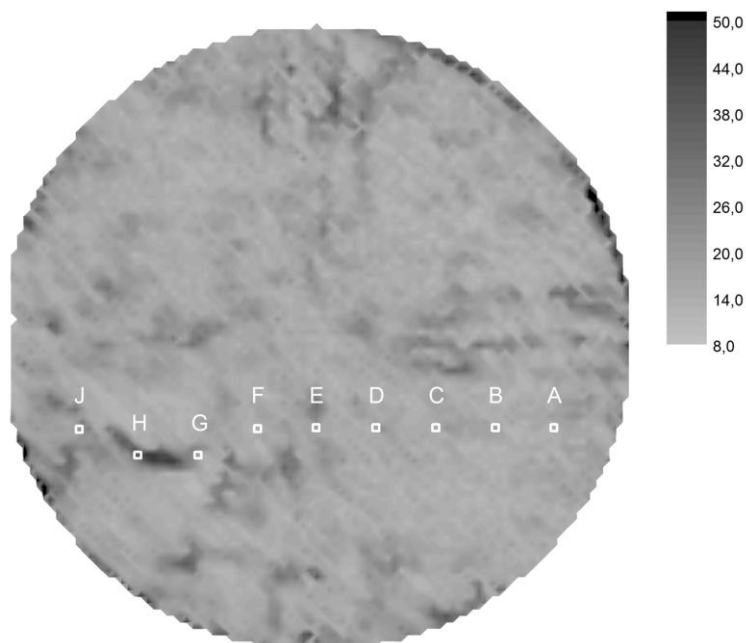


Abbildung 50: HRXRD-Map des untersuchten 4-Zoll VGF-Wafers. Entlang einer Linie wurden die HBTs A bis J untersucht.

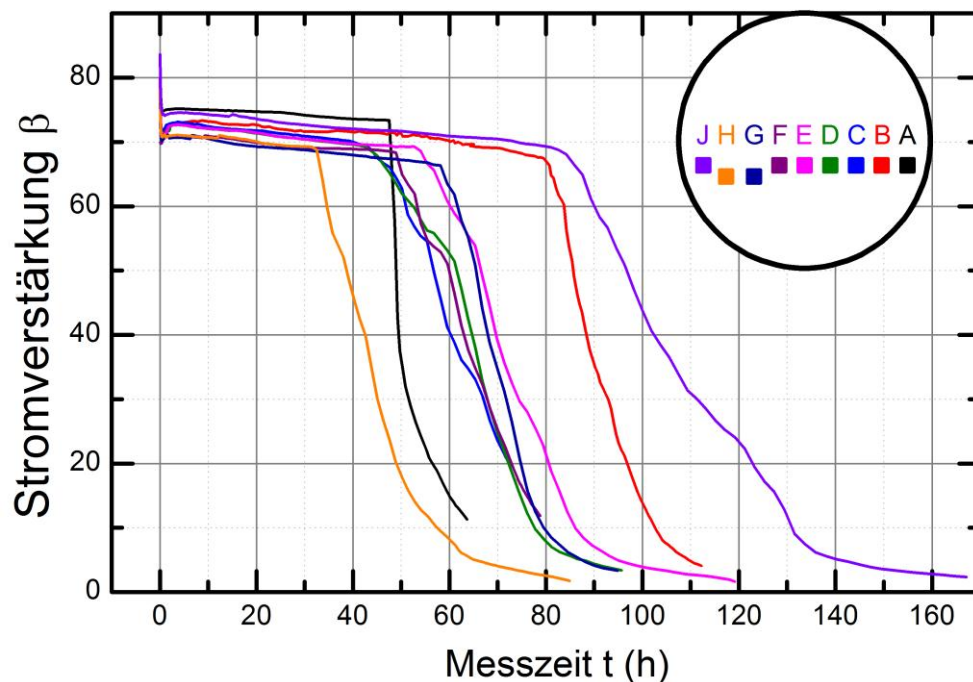


Abbildung 51: HBT Lebensdauerdaten über dem Wafer zur Untersuchung des Einflusses der Versetzungen auf die Lebensdauer. Alterungsbedingung: $U_C = 3,0 \text{ V}$, $I_C = 90 \text{ mA}$, $T_A = 150 \text{ °C}$

HRXRD-Maps gemessen, um die Verteilung der Versetzungsdichte über dem Wafer zu bestimmen. Auf dem ersten Wafer wurden Transistoren entlang einer Linie quer über den Wafer ausgesucht und on-wafer gealtert (Abbildung 50). Auf dem zweiten Wafer wurden Transistoren aus Bereichen mit hoher und niedriger Versetzungsdichte ausgewählt und on-wafer gealtert.

Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen an HBTs entlang der Linie sind in Abbildung 51 dargestellt. In zwei Punkten wurde von der Linie abgewichen, um Transistoren aus Bereichen mit höherer Versetzungsdichte zu untersuchen (G, H). Auffällig ist, dass im mittleren Bereich des Wafers die Transistoren ähnliche Lebensdauern aufweisen, während die Transistoren am Rand deutlich abweichende Lebensdauer – entweder deutlich kürzer (B, J) oder deutlich längere (A, H) – haben. Vergleicht man die Lebensdauerdaten mit der Verteilung der Versetzungsdichte über dem Wafer, so erkennt man, dass keine Korrelation zu beobachten ist.

Eine weitere Untersuchung erfolgte durch gezielte Alterung von Transistoren in Bereichen mit unterschiedlicher Versetzungsdichte (Abbildung 52). Zunächst wurden zwei Transistoren am Rand in einem Bereich mit mittel hoher Versetzungsdichte gemessen (Abbildung 52: A, B), wobei Transistor B in einem Bereich erhöhter Versetzungsdichte im Vergleich zu Transistor A liegt. Die Transistoren C und D wurden in der Mitte und Transistoren E und F am Rand des Wafers mit niedriger Versetzungsdichte gemessen. Die Messung der Transistoren G und H erfolgte unweit in einem Bereich höherer Versetzungsdichte.

Die Ergebnisse der Alterungsmessungen sind in Abbildung 53 dargestellt. Es fällt zunächst auf, dass die beiden Transistoren C und D aus der Mitte des Wafers eine deutliche höhere Lebensdauer aufweisen, als die restlichen Transistoren. Die Transistoren E und F, die etwas weiter am Rand sind, jedoch aus einem Bereich mit vergleichbarer Versetzungsdichte wie C und D sind, zeigen deutlich geringere Lebensdauern, wobei die Stromverstärkung bei diesen Transistoren vergleichbar ist. Dass die kurze Lebensdauer am Rand nicht durch Prozessfehler verursacht ist, konnte durch Auswertung der elektrischen Messungen über dem gesamten Wafer ausgeschlossen werden. Transistor A und B wurden aus einem Bereich mit höherer Versetzungsdichte ausgesucht und gealtert. Deren Lebensdauer – bei vergleichbarer Stromverstärkung – ist deutlich kürzer als die der Transistoren aus der Mitte (C, D), die aus Bereichen mit niedrigerer Versetzungsdichte stammen. Andererseits zeigen

Transistoren B, G, und H deutlich kurze Lebensdauern, bei ihnen ist aber auch die Stromverstärkung im Vergleich zu den anderen geringer, was die Vermutung zulässt, dass ihre elektrischen Eigenschaften auf Grund ihrer Lage am Rand sich vom Rest unterscheidet und sie daher auch früher ausfallen.

Obwohl die Daten kein klares Ergebnis zeigen, ob die Versetzungsdichte des

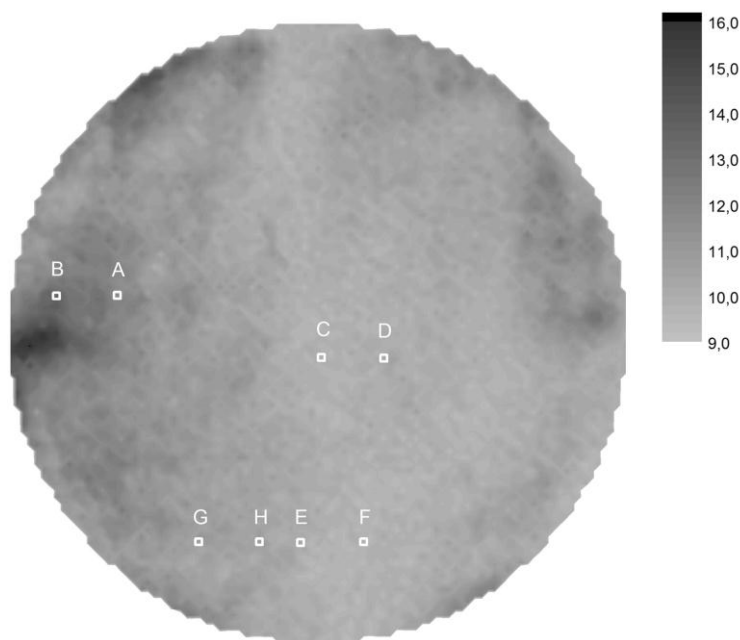


Abbildung 52: HRXRD-Map des untersuchten 4-Zoll VGF-Wafers. Punkte A bis F zeigen den Ort der untersuchten HBTs auf dem Wafer.

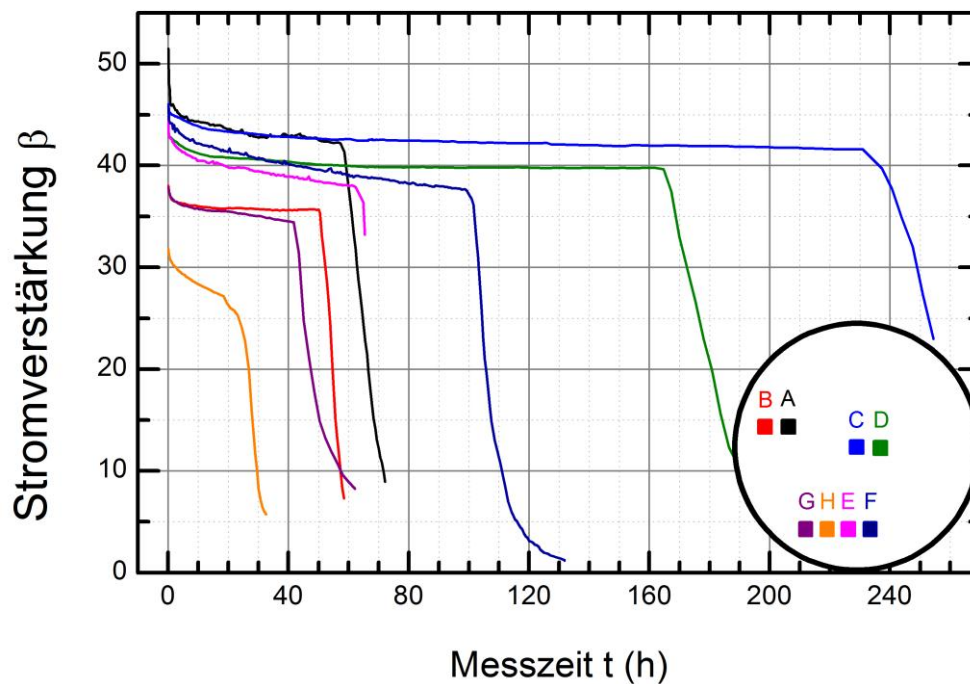


Abbildung 53: HBT Lebensdauerdaten über dem Wafer nach Versetzungsdichte zur Untersuchung von Einfluss der Versetzungen auf die Lebensdauer. Alterungsbedingung: $U_C = 3,0 \text{ V}$, $I_C = 90 \text{ mA}$, $T_A = 150 \text{ °C}$.

Substrats Einfluss auf die Lebensdauer der Transistoren hat, kann festgestellt werden, dass es eine Tendenz gibt, die diese Vermutung unterstreicht. Denn auch wenn ein Transistor auf einem Substrat mit hoher Versetzungsdichte hergestellt wird, ist sein Ausfall aufgrund von Versetzungen oder Defekte immer noch eine Frage der Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von der Dichte der Versetzungen ab (Tabelle 6). Aus den Messungen konnte wegen der geringen Anzahl der untersuchten Transistoren kein Einfluss der Versetzungsdichte im Substrat auf die Lebensdauer der Transistoren nachgewiesen werden. Auch die gezielte Alterung von Transistoren aus Bereichen mit höchst unterschiedlichen Versetzungsdichten zeigte keinen nachweisbaren Unterschied.

Kürzlich haben Low et al. eine Möglichkeit gefunden, um den Einfluss der Substratqualität auf die Zahl der Frühausfälle bei Alterung von GaAs HBTs nachzuweisen [Low07]. Sie entwickelten eine Schaltung mit der sie 200 HBTs gleichzeitig altern konnten. Pro Wafer wurden über 12800 Transistoren gemessen und gealtert. Diese Anzahl an Transistoren ermöglichte ihnen den Nachweis des Einflusses der Versetzungsdichte auf die Frühausfälle bei der Alterung. Low et al. haben festgestellt, dass die Anzahl der Frühausfälle proportional zur EPD des Substrats ist.

Die Frühausfälle werden wie bereits beschrieben durch die Existenz von Versetzungen im aktiven Bereich der Transistoren ausgelöst und besitzen im Vergleich zu den Ausfällen durch „Abnutzung“ (sogenannte „Wear Out Failure“) eine geringere Aktivierungsenergie [Alt07].

IV.4.2. Einfluss der Epitaxie auf die Lebensdauer der HBTs

Ein wichtiger Parameter in der Technologie, der sich sehr stark auf die Lebensdauer der Transistoren auswirken kann, ist die Epitaxie. In der Epitaxie werden die funktionalen Schichten der HBTs auf das Substrat aufgebracht, wobei die große Herausforderung darin besteht, die Schichten möglichst defektfrei aufzuwachsen. Trotz Wachstum einer speziellen Pufferschicht auf dem Substrat lässt es sich jedoch nicht vermeiden, dass sich die im Substrat bereits vorhandenen Versetzungen in die aufgewachsenen Epitaxieschichten fortsetzen [Kozu93]. Durch die Optimierung des Wachstumsprozesses kann jedoch an den Grenzflächen die Entstehung neuer Defekte unterbunden werden.

Besonders kritisch sind die Grenzflächen von Schichten mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung, da deren Wachstum eine Umschaltung der Ausgangsstoffe und möglicherweise auch unterschiedliche Wachstumstemperaturen erfordern. Dabei können sich unterschiedliche Gitterkonstanten ergeben, die zu Defektenstehung führen können. Während bei GaAs HBTs das Kollektor- und Basismaterial sich nur in der Dotierung – Kollektor: GaAs mit Si dotiert, Basis: GaAs mit C dotiert – unterscheiden, ist das Emitttermaterial (InGaP) anders zusammengesetzt. Die Gitterfehlانpassung wurde durch Optimierung des Emitterschichtwachstums der in dieser Arbeit untersuchten HBTs auf weniger als 0,5 ppm eingestellt [Brun02]. Wesentlich für die Zuverlässigkeit der HBTs sind die Materialqualität der hoch kohlenstoffdotierten Basisschicht und die Grenzfläche zum Emitter – also auch das Wachstum der Emitterschicht. Hier hat sich herausgestellt, dass optimale Wachstumsparameter und die Wahl der Kohlenstoffdotierungsart entscheidend für die Zuverlässigkeit der HBTs sind [Brun02].

In Abbildung 54 sind die Lebensdauerdaten von HBTs von Wafern während

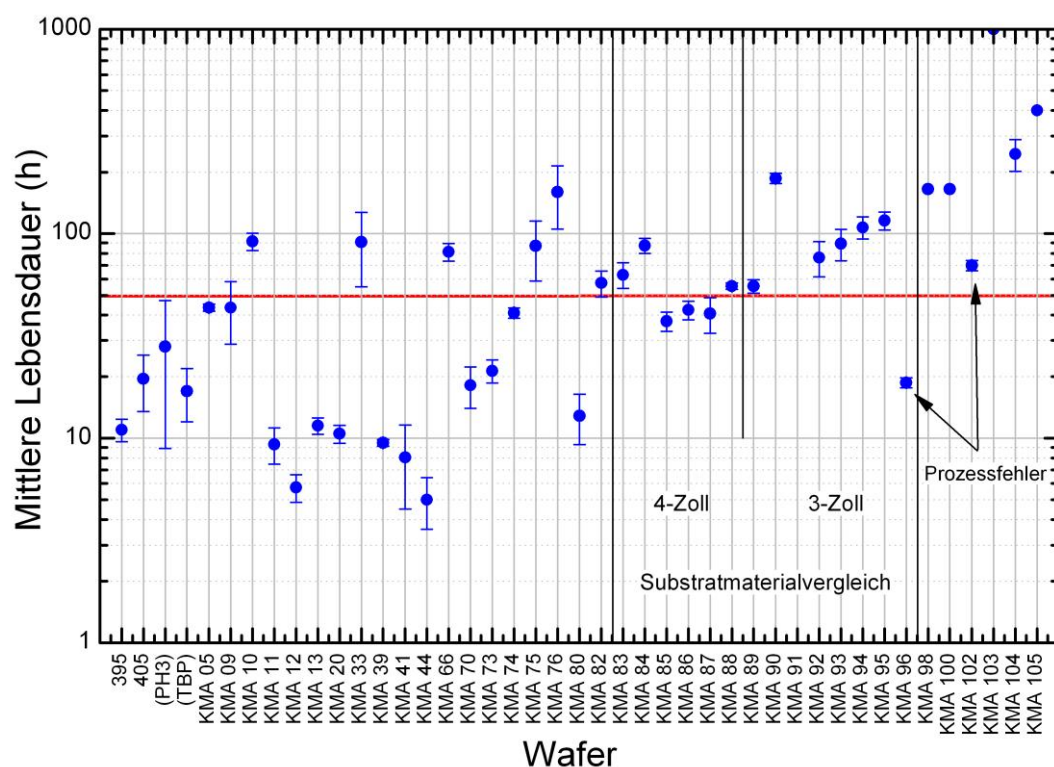


Abbildung 54: Lebensdauerdaten der beschleunigten Alterung von Standard-HBTs während der GaAs-HBT-Technologieentwicklung von verschiedenen Wafern bei einer Betriebsspannung von $U_C = 3,0 \text{ V}$ und einer Stromdichte von $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, die einer Junction-Temperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ entsprechen. Die Bezeichnungen an der x-Achse entsprechen dem Fortschritt der Technologieentwicklung.

der GaAs-HBT-Technologieentwicklung dargestellt. Die x-Achse entspricht der Waferdurchlauf-Nummer. Alle Lebensdauerdaten wurden bei einer Spannung von $U_{CE} = 3,0$ V und einer Stromdichte von $J_C = 1 \times 10^5$ A/cm² bestimmt. Dies entspricht einer Junction-Temperatur von $T_J = 300$ °C (beschleunigte Alterung). Die Lebensdauerdaten sind Durchschnittswerte aller Messungen und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung der Messdaten.

Die Streuungen zu Beginn der Entwicklung (bis KMA82) sind auf Änderungen in der Epitaxie zur Optimierung der HBTs zurückzuführen. So wurde das Wachstum der Basis und der Emitterschicht – insbesondere die Qualität der Basis-emitter-Grenzfläche – optimiert. Die Basisschicht wurde im Hinblick auf Wasserstoffeinbau während des Wachstums verbessert. So konnte die Wasserstoffkonzentration in der Basis durch Tempern bei 600 °C nach dem Wachstum der InGaP-Emitterschicht verringert werden [Brun03]. Danach ist die Epitaxie sehr stabil und ab KMA82 haben die Transistoren eine Mindestlebensdauer von > 50 Stunden in der beschleunigten Alterung – bei einer Junction-Temperatur von $T_J = 300$ °C – nahezu alle erreichen und sie konnte kontinuierlich verbessert werden. Einige Ausreißer der Daten, wie zum Beispiel KMA96 oder KMA102 sind auf Prozessfehler zurückzuführen. So hatte es bei KMA96 Probleme mit Lackschichten während der Ätzung der Emittermesa gegeben. Bei KMA102 wurde der Emitter zu stark unterätzt, sodass die effektive Emitterfingerbreite deutlich geringer als die gewünschten 3 µm war. Dadurch war die Stromdichte während der Alterung deutlich höher als bei anderen Alterungen, was folglich zu früherem Ausfall der Transistoren führte.

Der Vergleich der Substrate im Hinblick auf Einfluss ihrer Qualität auf die Lebensdauer kann auch hier durchgeführt werden. Es fällt auf, dass die Transistoren der 3-Zoll-Wafer im Vergleich zu den 4-Zoll-Wafer trotz des gleichen Epitaxieprozesses eine etwas bessere Lebensdauer aufweisen.

Insgesamt jedoch ist zu erkennen, dass die Lebensdauermessungen die Entwicklung einer Technologie zur Herstellung zuverlässiger GaAs-HBT erfolgreich unterstützen konnte.

IV.5. Bestimmung der mittleren HBT-Lebensdauer

Die Bestimmung der mittleren Lebensdauer $MTTF$ der HBTs erfolgt durch beschleunigte Alterung nach dem Arrhenius-Modell (vgl. II.2.1). Es setzt die Beschleunigung der Alterung durch die Temperatur voraus [Arrh89] [Galw95]. Deshalb erfolgt die $MTTF$ -Bestimmung von HBTs desselben Wafers im gleichen Arbeitspunkt bei verschiedenen Junction-Temperaturen T_J . Aufgrund des Zeitaufwandes solcher Messungen wurden sie bei aufgebauten Transistoren (Standard-HBT mit $A_E = 1 \times 3 \times 30 \text{ } \mu\text{m}^2$) durchgeführt.

Um das $MTTF$ genau bestimmen zu können, wurden die gehäuteten HBTs bei mindestens drei Temperaturen gealtert. Die beschleunigten Alterungen wurden bei einer Kollektorspannung von $U_C = 3,0 \text{ V}$ durchgeführt, und der Basisstrom wurde so eingestellt, dass die gewünschte Kollektorstromdichte erreicht wurde. Zunächst wurden die Alterungen bei einer Stromdichte von $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ durchgeführt. Diese Stromdichte wurde durch den Stufentest (vgl. IV.1.3) ermittelt und auch bei den Schnelltests eingesetzt. Später wurde die Stromdichte auf $J_C = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ reduziert, um die Alterung bei gleicher Junction-Temperatur T_J durch die Umgebungstemperatur T_A zu beschleunigen. Zum Beispiel erfordert eine Junction-Temperatur $T_J = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ in HBTs mit einem thermischen Widerstand von $R_{th} = 550 \text{ K/W}$ bei einer Stromdichte von $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ eine Umgebungstemperatur von ca. $T_A = 126 \text{ }^\circ\text{C}$, während bei einer Stromdichte von $J_C = 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ eine Umgebungstemperatur von ca. $T_A = 166 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt werden muss (vgl. Tabelle 3). Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass alle Komponenten bei den gehäuteten HBTs durch die benötigte Umgebungstemperatur selbst nicht beschädigt werden und zuverlässig funktionieren.

Wie bereits in Abschnitt IV.1.3 erwähnt, sollte die Junction-Temperatur während der beschleunigten Alterung nicht zu hoch gewählt werden, weil dadurch Degradationsmechanismen aktiviert werden können, die bei normalen Betriebsbedingungen nicht auftreten. Ab einer bestimmten kritischen Temperatur T_C fallen HBTs aufgrund von thermisch aktivierten Mechanismen aus [Hend99]. Unterhalb dieser kritischen Temperatur fallen die HBTs aufgrund strominduzierter Mechanismen aus, die zur Defektentstehung in der kristallinen Struktur der HBTs führen. Die kritische Temperatur wird durch den Anstieg der Aktivierungsenergie hin zu höhe-

ren Junction-Temperaturen gekennzeichnet. Der Betrag der kritischen Temperatur T_c hängt vom Layout, der Geometrie und auch von der eingesetzten Stromdichte und Belastung der HBTs während der Alterung ab [Hend96].

Um den Einfluss hoher Junction-Temperaturen auf die Bestimmung der mittleren Lebensdauer zu untersuchen, wurde eine *MTTF*-Messung bei Junction-Temperaturen von $T_j \approx 260^\circ\text{C}$ bis $\approx 350^\circ\text{C}$ durchgeführt (Abbildung 55). Die

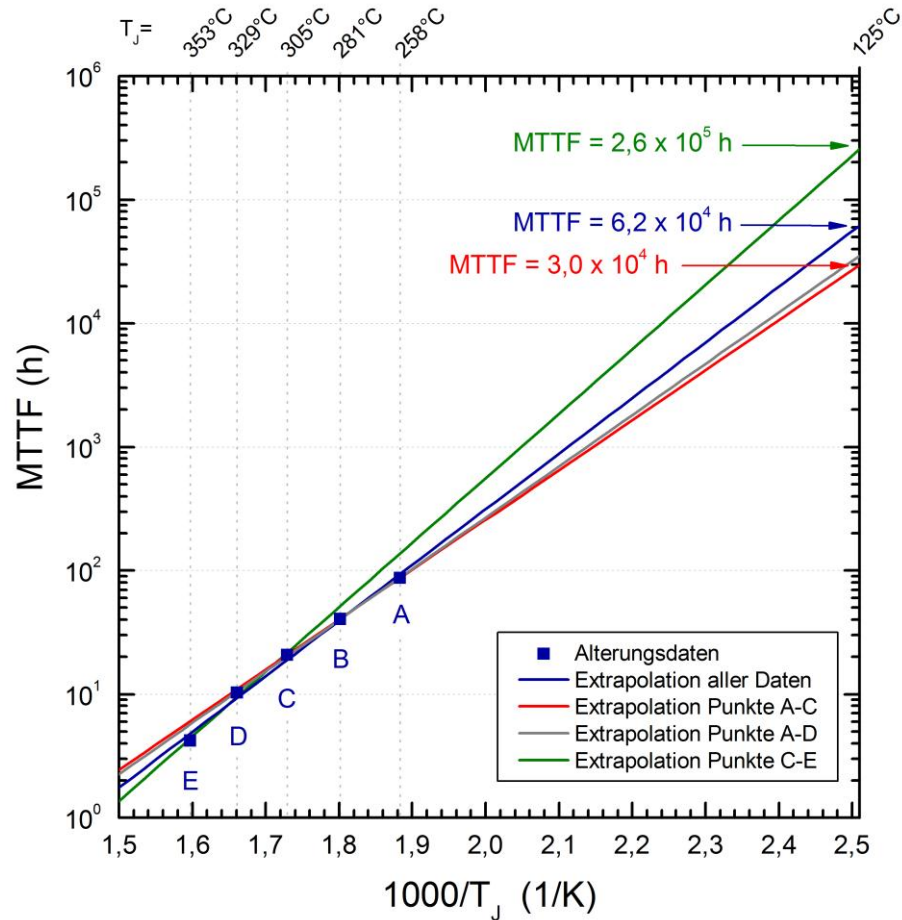


Abbildung 55: Arrhenius-Diagramm zur Bestimmung des *MTTF* von GaAs HBTs bei einer Kollektorspannung von $U_{CE} = 3,0\text{ V}$ und einer Kollektorstromdichte von $J_C = 1 \times 10^5\text{ A/cm}^2$. Hier wurden zusätzlich Alterungen bei hoher Junction-Temperatur $T_j = 329^\circ\text{C}$ und 353°C durchgeführt, um deren Einfluss auf Extrapolation der Lebensdauerdaten und der Bestimmung von *MTTF* zu untersuchen.

Messpunkte für Extrapolation	Ergebnis der Extrapolation	
	MTTF (h)	E_A (eV)
ABCDE	$6,2 \times 10^4$	0,893
ABCD	$3,5 \times 10^4$	0,824
ABC	$3,0 \times 10^4$	0,802
CDE	$2,6 \times 10^5$	1,036

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Abbildung 55.

Messpunkte A bis E sind Mittelwerte der Lebensdauerdaten von jeweils sechs HBTs bei den entsprechenden Junction-Temperaturen, wobei Messpunkt E bei $T_j \approx 350^\circ\text{C}$ der zusätzliche Messpunkt bei hoher Junction-Temperatur ist. Um den Einfluss der hohen Junction-Temperaturen bei $T_j \approx 330^\circ\text{C}$ und $\approx 350^\circ\text{C}$ auf die Extrapolation zu untersuchen wurde zunächst Messpunkt E für die *MTTF*-Bestimmung nicht berücksichtigt. Die Extrapolation der Lebensdauerdaten A bis D auf eine Junction-Temperatur von $T_j = 125^\circ\text{C}$ ergibt eine *MTTF* von ca. $3,5 \times 10^4$ Stunden. Nimmt man zusätzlich Messpunkt D aus der Extrapolation heraus, und extrapoliert die anderen Messdaten A bis C erhält man eine *MTTF* von ca. $3,0 \times 10^4$ Stunden. Also scheint die Alterung bei $T_j \approx 330^\circ\text{C}$ die *MTTF*-Bestimmung nicht so sehr zu beeinflussen. Nimmt man für die Extrapolation alle Messpunkte hinzu, dann erhöht sich der extrapolierte *MTTF* auf $6,2 \times 10^4$ Stunden. Dies ist nahezu eine Verdopplung der mittleren Lebensdauer im Vergleich zur Extrapolation der Messpunkte A bis C und zeigt, dass die Wahl hoher Junction-Temperaturen zur Überschätzung der mittleren Lebensdauer führen kann (Tabelle 6). Dies wird umso mehr ersichtlich, wenn man nur die drei Messpunkte bei den höchsten Junction-Temperaturen (Punkte C bis E) extrapoliert. Dabei erhält mit $2,6 \times 10^5$ Stunden man eine ca. 8-fach höhere Lebensdauer bei $T_j = 125^\circ\text{C}$, was ein Zeichen für die Aktivierung ungewöhnlicher Degradationsmechanismen sein kann. Andererseits erkennt man die Wichtigkeit von Messungen bei niedrigerer Junction-Temperatur, um zuverlässigere Lebensdauerdaten durch die Extrapolation zu erhalten. Für die Lebensdauerermessung am FBH und in dieser Arbeit wurde die kritische Temperatur bei $T_c = 330^\circ\text{C}$ festgelegt und für weitere Messung wurden Junction-Temperaturen geringer als dieser Wert verwendet.

Lee et al. haben ein phänomenologisches Modell entwickelt, um den Einfluss der Junction-Temperatur auf die mittlere Lebensdauer zu beschreiben [Lee08]. Das Modell muss entsprechend an experimentelle Daten angepasst werden, zeigt jedoch auf, wo die Grenzen der beschleunigten Alterung liegen. Abbildung 56 zeigt das Ergebnis des Modells. Dabei wurden die Aktivierungsenergien für den thermischen Ausfallmechanismus auf 1,7 eV und für den Defektentstehungsmechanismus auf 0,9 eV festgelegt.

Zunächst ist zu erkennen, dass die Alterung bei niedrigeren Stromdichten bei gleicher Junction-Temperatur zu längeren Lebensdauerdaten führt. Zusätzlich ist deutlich zu erkennen, dass der Verlauf der mittleren Lebensdauerkurven bei konstanter Stromdichte hin zu hohen Junction-Temperaturen keine lineare Abhängigkeit von $1/T_J$ hat. Dies bestätigt die bereits diskutierten experimentellen Beobachtungen. Ein Vergleich der gemessenen Lebensdauerdaten und Aktivierungsenergien mit dem Modell in Abbildung 56 zeigt, dass die Verlaufsform der Messdaten vom Modell gut beschrieben werden. Durch die Aktivierung der thermischen Ausfallmechanismen bei höheren Junction-Temperaturen steigt die Aktivierungsenergie an und gleichzeitig wird die Abweichung der Messpunkte von der linearen Abhängigkeit der Lebensdauerdaten von $1/T_J$ größer.

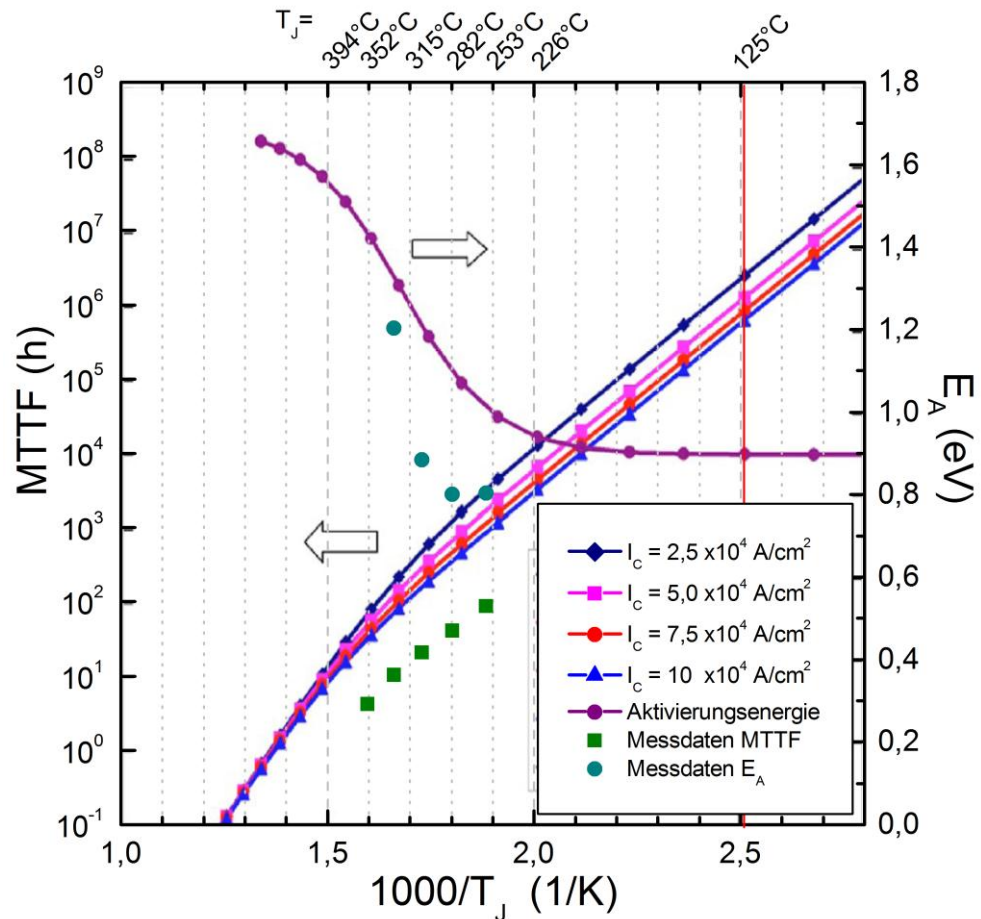


Abbildung 56: Modell von Lee et al. zur Abschätzung der Lebensdauer von GaAs HBTs [Lee08]. Hier wurden Aktivierungsenergien von 1,7 eV für den thermisch aktivierten Ausfallmechanismus und von 0,9 eV für Defektentstehungsmechanismus ausgewählt. Mit eingezeichnet sind die HBT Lebensdauerdaten und die daraus bestimmte Aktivierungsenergie einer der ersten Generationen am FBH. Sie wurden bei einer Kollektorspannung von 3 V und einer Kollektorstromdichte von $10 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ beschleunigt gealtert. Die Verlaufsform der Daten und der Aktivierungsenergie wird von der Simulation gut beschrieben.

Nach mehreren Optimierungsschritten der GaAs-HBT-Technologie wurde eine Langzeitlebensdauerermessung zur *MTTF*-Bestimmung von aufgebauten HBTs durchgeführt. Die HBTs wurden bei einer Kollektorspannung von $U_C = 3,0$ V und einer Kollektorstromdichte von $J_C = 8 \times 10^4$ A/cm² beschleunigt gealtert. Ziel dieser Untersuchung war die Alterung auch bei niedrigeren Junction-Temperaturen. Es wurden fünf Gruppen von jeweils sechs HBTs bei Junction-Temperaturen von $T_J = 236$ °C bis 318 °C gealtert (Abbildung 57). Die Messdaten im Arrhenius-Diagramm sind die Durchschnittswerte der Lebensdauerdaten für die jeweilige Junction-Temperatur. Die höchste Lebensdauer zeigten HBTs bei der niedrigsten Junction-Temperatur $T_J = 236$ °C mit mehr als 19500 Stunden (ca. 27 Monate). Der entsprechende HBT war zum Zeitpunkt des Messabbruchs noch nicht ausgefallen.

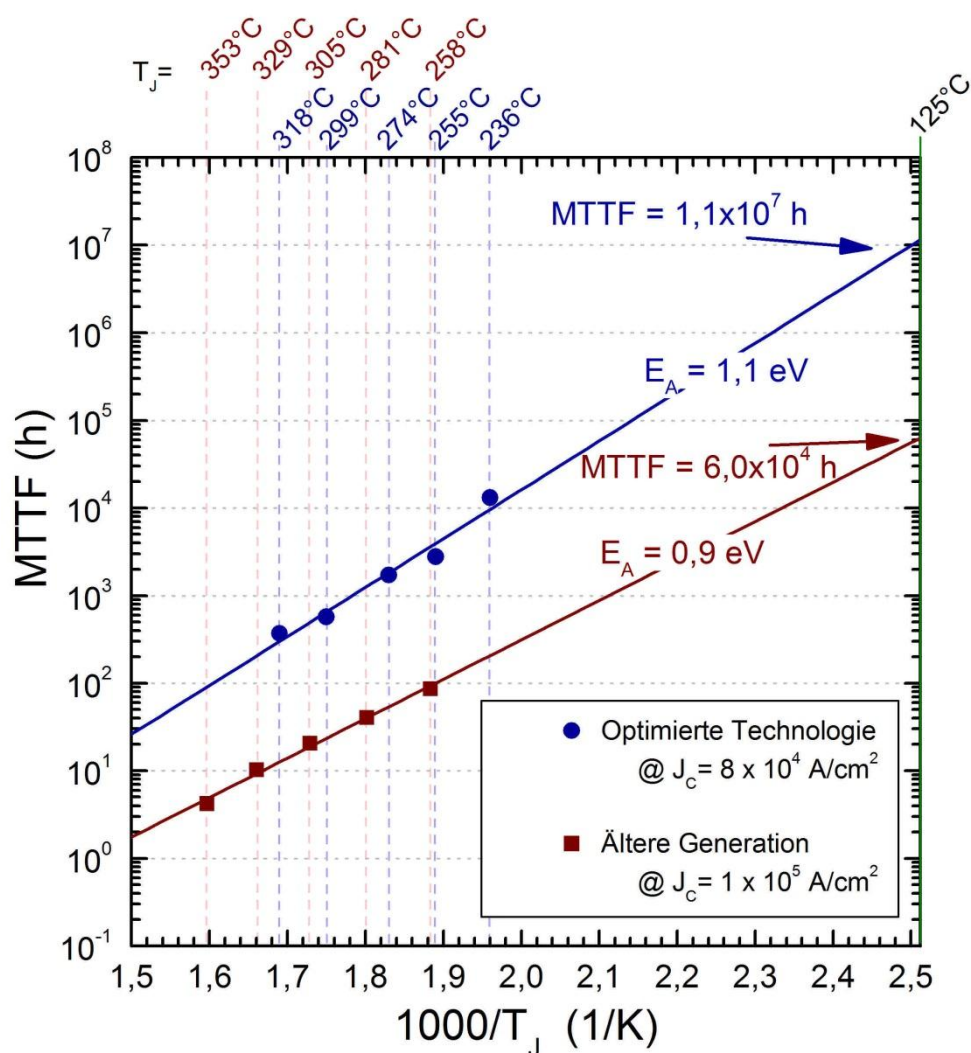


Abbildung 57: MTTF-Bestimmung von Transistoren von Wafern zur Beginn und zum Abschluss der GaAs-HBT-Entwicklung. Durch Optimierung der Qualität der Epitaxieschichten und des Prozesses wurde die mittlere Lebensdauer auf $1,1 \times 10^7$ Stunden deutlich erhöht, dabei stieg die Aktivierungsenergie auf 1,1 eV.

Die mittlere Lebensdauer $MTTF$ der HBTs wurde von $3,0 \times 10^4$ Stunden für die der ersten Generation auf $1,1 \times 10^5$ Stunden für die HBTs der letzten Generation der Technologieentwicklung verbessert. Dabei stieg die Aktivierungsenergie von 0,8 eV auf 1,1 eV (Abbildung 57). Das Ergebnis der $MTTF$ -Bestimmung für die ausgereifte Technologie von ca. $1,1 \times 10^7$ Stunden, das entspricht fast 1300 Jahren, übertrifft das Ziel der Technologieentwicklung von 1×10^6 Stunden. Dabei besitzen die HBTs sehr gut elektrische Eigenschaften, sowohl DC als auch HF (vgl. IV.1.3). Somit ist die Zuverlässigkeit der HBTs nicht auf Kosten anderer Parameter erzielt worden.

Um die Lebensdauerergebnisse dieser Arbeit mit Daten anderer Forschungsgruppen und Herstellern zu vergleichen, ist sehr viel Vorsicht geboten, da andere Gruppen die Lebensdauer bei sehr unterschiedlichen Alterungsbedingungen bestimmen und zum Teil auch unterschiedliche Messmethoden verwenden. Einige Gruppen haben $MTTF$ -Werte von über 1×10^8 h veröffentlicht [Adle00] [Gupt01]

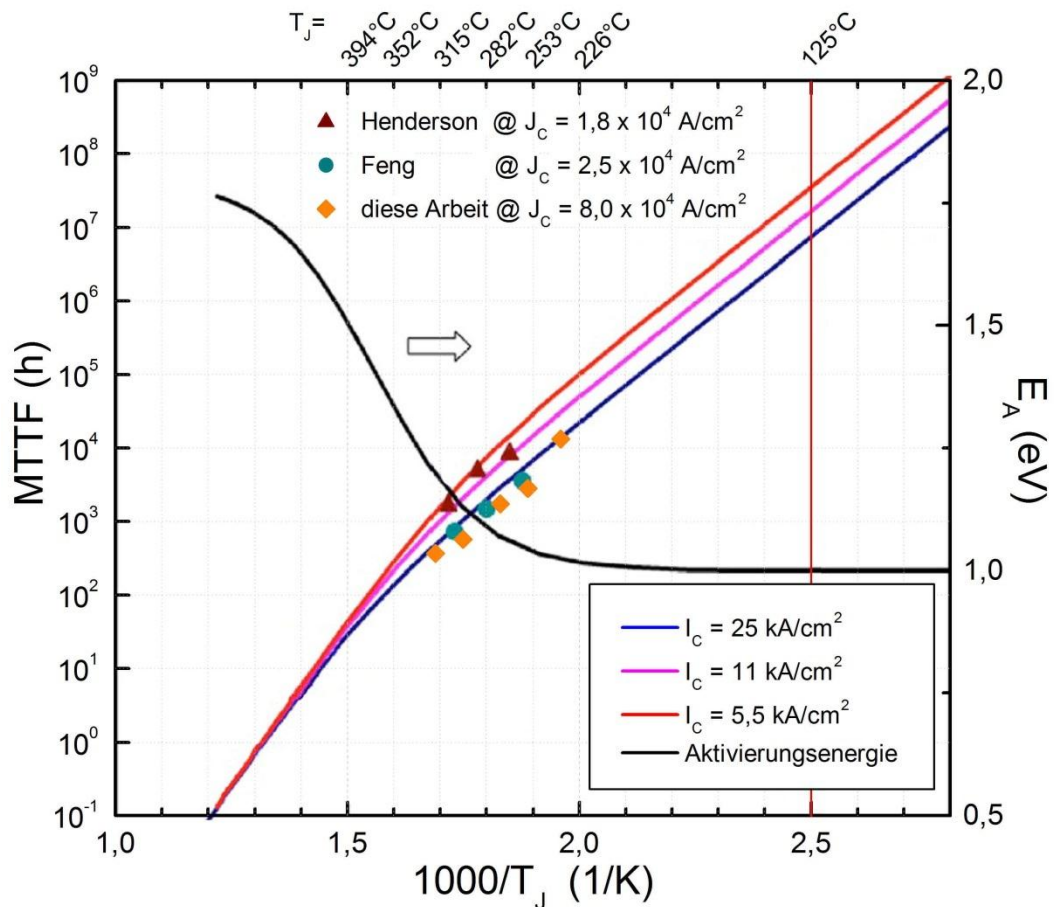


Abbildung 58: Modell von Lee et al. zur Abschätzung der Lebensdauer von GaAs HBTs [Lee08]. Hier wurden Aktivierungsenergien von 1,7 eV für den thermisch aktivierten Ausfallmechanismus und von 0,9 eV für Defektentstehungsmechanismus ausgewählt.

[Ohku30], wobei sie gleichzeitig sehr hohe Aktivierungsenergien von mehr als 1,5 eV bestimmt haben. Dabei fällt auf, dass die Alterungen bei Junction-Temperaturen von deutlich mehr als 320 °C durchgeführt wurden. Diese hohen Temperaturen sind die Ursache für die großen *MTTF*-Werte, was bei Betrachtung der Simulation von Lee et al. in Abbildung 56 deutlich wird. Bestätigt werden die Ergebnisse dieser Arbeit von Gruppen, die die HBTs zwar bei unterschiedlichen Stromdichten gealtert haben, aber vergleichbare Ergebnisse für die mittlere Lebensdauer *MTTF* und für die Aktivierungsenergie E_A bestimmen konnten. Feng et al. haben bei einer Stromdichte von $J_C = 2,5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ eine *MTTF* von $7 \times 10^6 \text{ h}$ und eine Aktivierungsenergie von 0,97 eV für ihre Technologie bestimmt [Feng01]. Henderson hat für die Triqint HBT-Technologie eine mittlere Lebensdauer von ca. $1 \times 10^7 \text{ h}$ bestimmt, jedoch bei geringerer Stromdichte von $J_C = 5,5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ [Hend02].

Ein Vergleich der Messergebnisse in dieser Arbeit und die von Henderson und Feng mit dem Modell von Lee zeigt deutlich die herausragende Zuverlässigkeit der am FBH hergestellten InGaP/GaAs HBTs (Abbildung 58). Die Daten liegen zwar sehr nahe beieinander und werden sehr gut vom Modell beschrieben, jedoch ist zu bedenken, dass die Daten in dieser Arbeit bei deutlich höherer Stromdichte bestimmt wurden, was normalerweise zu niedrigeren Lebensdauerwerten führt (vgl. II.2.1.2) [Feng01]. Die in dieser Arbeit bestimmten Werte für die Lebensdauer der Transistoren aus der „gereiften“ Technologie zeigen, dass die GaAs-HBT-Technologie von der Zuverlässigkeit her Weltspitze ist.

V. Analytische Untersuchung degradierter HBTs

Die Entwicklung von zuverlässigen HBTs erfordert neben der Messtechnik, der Messmethodik und der statistischen Auswertung zur Bestimmung der Lebensdauer auch die Analyse der Degradationsmechanismen der HBTs. Dabei sollen die Ursachen für den Ausfall der Transistoren während der Alterung gefunden und charakterisiert werden, indem gezielt z. B. vermutete Schwachstellen des Transistors untersucht werden. Die wichtigsten Degradationsmechanismen in GaAs HBTs sind:

- Rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion *REDR*
- Metалldiffusion ins Halbleitermaterial
- Diffusion von Dotierungselementen

Für die Untersuchung dieser Degradationsmechanismen wurden in dieser Arbeit die folgenden analytischen Methoden eingesetzt:

- Elektrolumineszenz (EL),
- fokussierte Ionenstrahlen (FIB),
- Transmissionselektronenmikroskop (TEM)
- energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDXS)

Die Untersuchungen wurden wie folgt durchgeführt: Zunächst wurden an speziell entworfenen HBTs Elektrolumineszenzuntersuchungen durchgeführt, um Defektentstehung und -ausbreitung sichtbar zu machen. Daraufgehend wurden degradierte HBTs in TEM untersucht, um Versetzungen im Bauelement, zu lokalisieren und zu charakterisieren. Mit dem im TEM vorhandenen EDXS-System wurden degradierte HBTs auf Degradationsmechanismen wie Metалldiffusion [Liu98], Kohlenstoffpräzipitate [Taka94] und Diffusion von Halbleitermaterialien untersucht. Zusätzlich wurden unbelastete HBTs als Referenzproben untersucht, um auszuschließen, dass die Befunde in den degradierten HBTs bereits vor der Alterung vorhanden waren.

In den nächsten Abschnitten werden die untersuchten Degradationsmechanismen und die in dieser Arbeit eingesetzten analytischen Methoden zur Untersuchung von degradierten HBTs vorgestellt und die Ergebnisse beschrieben und diskutiert.

V.1. Rekombinationsbeschleunigte Defektreaktionen

Ein dominierender Degradationsmechanismus in HBTs ist die sogenannte rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion *REDR*¹. Dabei spielt die nicht strahlende Rekombination von Ladungsträgern eine wichtige Rolle und kann wie folgt beschrieben werden: Während die Basis-Emitter-Diode in der Durchlassrichtung geschaltet ist, fließen Minoritätsladungsträger (Elektronen) in die Basis, wodurch es zu Rekombinationen kommt. Ein Teil der Rekombination erfolgt unter Emission von Photonen; wobei Elektronen und Löcher direkt über die Bandlücke rekombinieren (Abbildung 59A). Ein anderer Teil jedoch rekombiniert über Energiezustände in der Bandlücke und emittiert die Energie als Phononen (Abbildung 59B). Diese Energiezustände in der Bandlücke entstehen während der Alterung durch Kristallfehlern wie Leerstellen, Zwischengitterplatzdefekte und Versetzungen. Die emittierten Phononen können wiederum zur Entstehung neuer Defekte oder deren Bewegung im Gitter führen. Diese Defekte können zusammenwachsen und größere Defekte bzw. Versetzungen und dadurch größere Rekombinationszentren bilden. Eine schematische Darstellung des Ablaufs in HBTs ist in Abbildung 60 dargestellt [Ueda88]. Die Bezeichnung *REDR* wurde gewählt, um zu verdeutlichen, dass es sich um einen Prozess handelt, bei dem die Elektron-Loch-Rekombination an einem Defekt zur Beschleunigung von Defektentstehung und -ausbreitung durch positive Rückkopplung führt. Die Erhöhung des Rekombinationsstroms ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung des Leckstroms in der Basis und führt mit der Zeit zur Degradation der Stromverstärkung. Dieser Prozess wurde zuerst von Kimerling beschrieben [Kime78].

Für die Zuverlässigkeit der HBTs können aber auch die emittierten Photonen

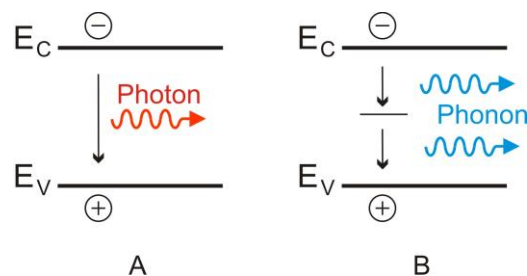


Abbildung 59: Rekombination unter Emission von Photonen (A) und Phononen (B)

¹ *REDR*, englisch: „recombination enhanced defect reaction“

eine Rolle spielen. Sie können an anderer Stelle im Kristall von Defekten absorbiert werden. Die Energie des Photons kann dann ausreichen, damit der Defekt im Kristall „gleitet“. Auch dies ist ein Teil der positiven Rückkopplung.

Dass der REDR als Degradationsmechanismus sehr stark von der Stromdichte abhängt, wurde durch die Alterung von speziellen HBTs der finalen GaAs-HBT-Technologie für Betrieb bei hohen Spannungen – sogenannte Hochvolt-HBTs (HV-HBT) – gezeigt. Diese HV-HBTs haben im Vergleich zu den in dieser Arbeit untersuchten Standard-HBTs eine dickere (3,5 statt 1,0 μm) und niedriger dotierte ($4\text{--}6 \times 10^{15}$ statt $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) Kollektorschicht. Dadurch haben die HV-HBTs eine hohe Durchbruchspannung von bis zu 70 V. Aufgrund der dicken Kollektorschicht und daraus resultierenden höheren, seriellen Widerstands des Kollektors haben die HV-HBTs jedoch eine niedrigere maximale Kollektorstromdichte von $3\text{--}5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$. Die maximale Stromverstärkung der HV-HBTs ist im Vergleich zu Standard-HBTs bei etwa der Hälfte (80 gegenüber 160).

Die Alterung von HV-HBTs wurde bei einer Kollektorspannung von 28 V und einer Kollektorstromdichte von $1,2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ durchgeführt (Abbildung 61). Die Umgebungstemperatur lag bei 70 °C, woraus sich eine Junction-Temperatur von 280 °C ergibt. Die fünf untersuchten HV-HBTs zeigten nach 5500 h Alterung kein Anzeichen von Degradation. Vergleicht man dieses Lebensdauerergebnis mit dem der Standard-HBTs bei vergleichbarer Junction-Temperatur (vgl. Abbildung 57), so erkennt man dass die HV-HBTs deutlich länger leben (mindestens 5500 h im Vergleich zu ca. 2000 h). Dies liegt an der niedrigen Kollektorstromdichte und dem demzufolge geringen REDR.

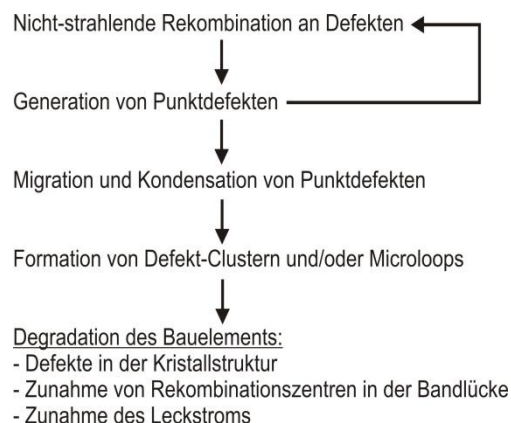


Abbildung 60: Prozess der graduellen Degradation durch REDR in GaAs HBTs nach Henderson [Hend99]

Dieses Ergebnis ist im Einklang mit den Ergebnissen aus Abschnitt II.2.1.2, wo die Strombeschleunigung der Alterung durch Messungen bei verschiedenen Stromdichten gezeigt wurde. Das Modell von Lee et al. aus Abschnitt IV.5 bestätigt die Ergebnisse ebenso.

Eine Methode zum Nachweis des REDR ist die Untersuchung der Elektrolumineszenz der HBTs während der Alterung. REDR führt in der Basis aufgrund entstehender und wachsender Defekte und Versetzungen zu einer verstärkten nicht-strahlenden Rekombination. Diese macht sich durch Ausbreitung dunkler Linien – sogenannter Dark-Line Defects (DLDs) – in der Elektrolumineszenz bemerkbar (Abbildung 62) [Hend96]. Die DLDs werden durch ihre Richtung charakterisiert. Die von Henderson in HBTs beobachteten DLDs kommen überwiegend in den $\langle 110 \rangle$ Richtungen vor. Sie sind bereits aus GaAs-basierten LEDs und LDs bekannt [Ueda96].

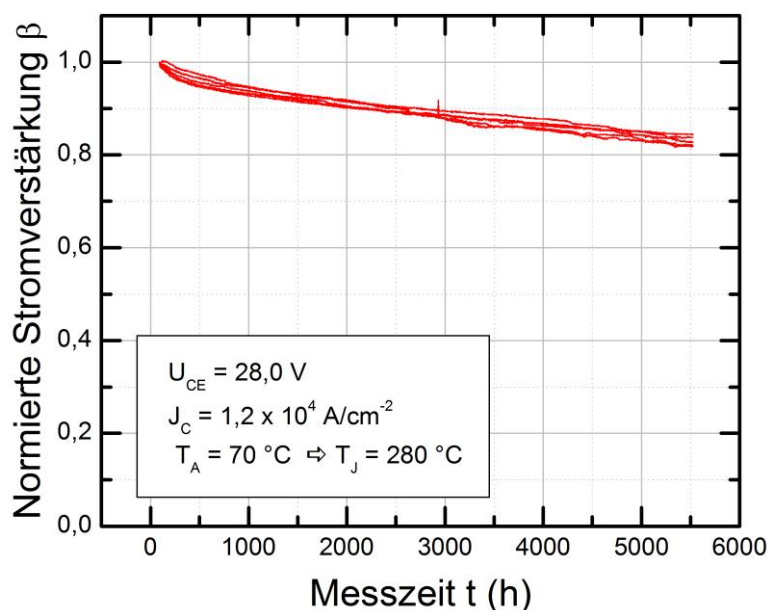


Abbildung 61: Lebensdauerermessung von Hochvolt-HBTs bei hoher Kollektorspannung von 28 V und niedriger Kollektorstromdichte von $1,2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$. Die resultierende Junction-Temperatur liegt bei 280 °C. Keiner der 5 HV-HBTs ist nach 5500 h Belastung ausgefallen, was auf die hervorragende Zuverlässigkeit der Technologie zurück geht.



Abbildung 62: Elektrolumineszenzaufnahmen eines Bauelements vor der Alterung (A), nach der graduellen Degradation (B) und nach der katastrophalen Degradation (C) [Hend96].

V.2. Elektrolumineszenz

Elektrolumineszenz (EL) ist ein optisches Phänomen in Halbleitern mit p-n-Übergang, wobei Photonen mit charakteristischer Wellenlänge durch Anlegen von Strom emittiert werden. Es ist die Folge der Rekombination eines Elektrons und eines Lochs, wobei ein Photon mit der Energie der Bandlücke emittiert wird.

In GaAs HBTs tritt dieses Phänomen durch die Rekombination von Elektronen und Löchern in der Basis auf (Abbildung 63). Die hochdotierte Basis ($p = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) besitzt eine geringere Bandlücke ($E_{G,Basis} \approx 1,34 \text{ eV}$) als der Kollektor und das Substrat, die jeweils eine Bandlücke von ca. 1,42 eV besitzen [Rich95]. Die aus der Basis emittierten Photonen, deren Wellenlänge ($\lambda \approx 926 \text{ nm}$) im infraroten Bereich liegt, werden im übrigen Bauelement aufgrund ihrer niedrigen Energie nicht absorbiert und können von der Substratseite beobachtet werden. An Versetzungen und Defekten erfolgt die Rekombination unter der Emission von Phononen, was in EL-Aufnahmen als dunkle Bereiche – sogenannte DLDs (*englisch*: „dark line defects“) sichtbar wird. Um die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung und Beobachtung von Versetzungen zu erhöhen, wurden auf denselben Wafern mit den untersuchten Standard-HBTs ($A_E = 1 \times 3 \times 30 \text{ } \mu\text{m}^2$) für die Lebensdaueruntersuchung, sogenannte Mehrfinger-HBTs mit $A_E = 16 \times 2 \times 120 \text{ } \mu\text{m}^2$ bzw. $A_E = 20 \times 2 \times 100 \text{ } \mu\text{m}^2$ entwickelt und hergestellt.

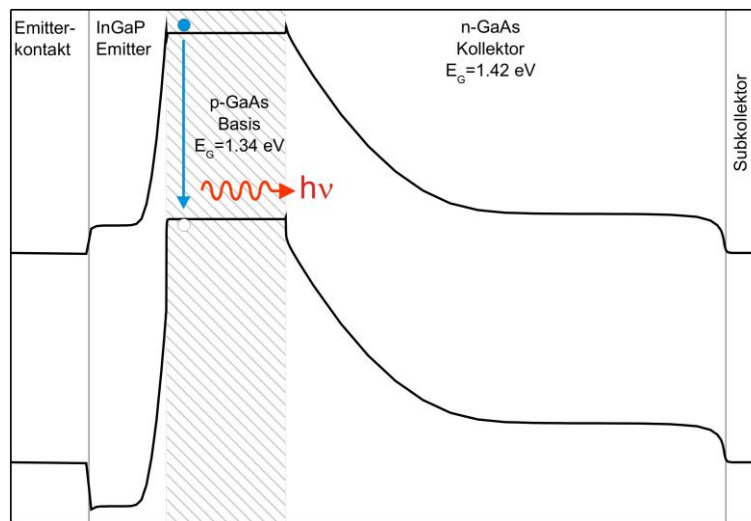


Abbildung 63: Elektrolumineszenz im Bänderdiagramm Photonenemission bei der Rekombination von Elektronen mit Löchern.

Die emittierten Photonen sind theoretisch auch von der Vorderseite des Wafers bzw. der HBTs zu beobachten, jedoch versperren die Metallschichten den Weg. Für die EL-Untersuchung müssen die Bauelemente so aufgebaut werden, dass die Substratoberfläche nach oben zeigt. Daher wurden die HBTs für diese Untersuchung flip-chip aufgebaut (Abbildung 64). Um die HBTs flip-chip aufbauen zu können, wurde eine spezielle Metallisierungsstruktur entwickelt, um diese auf spezielle Träger löten zu können [Kurp03]. Diese Träger besitzen geeignete Kontakte und können in Gehäuse eingeklebt oder eingelötet werden. Die Kontakte werden dann an die Kontakte des Gehäuses angebondet (Abbildung 65). Die Bauelemente

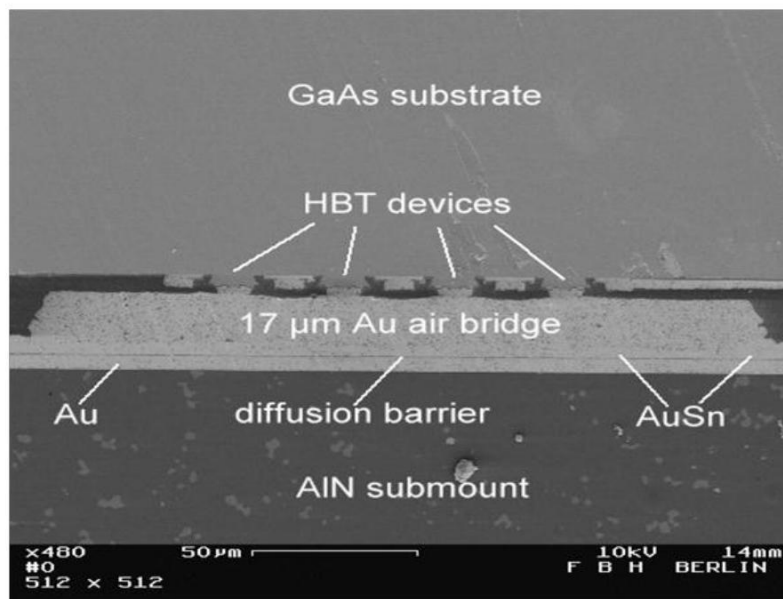


Abbildung 64: SEM-Aufnahme vom Querschnitt eines Multifinger-HBTs im flip-chip Aufbau [Kurp04].

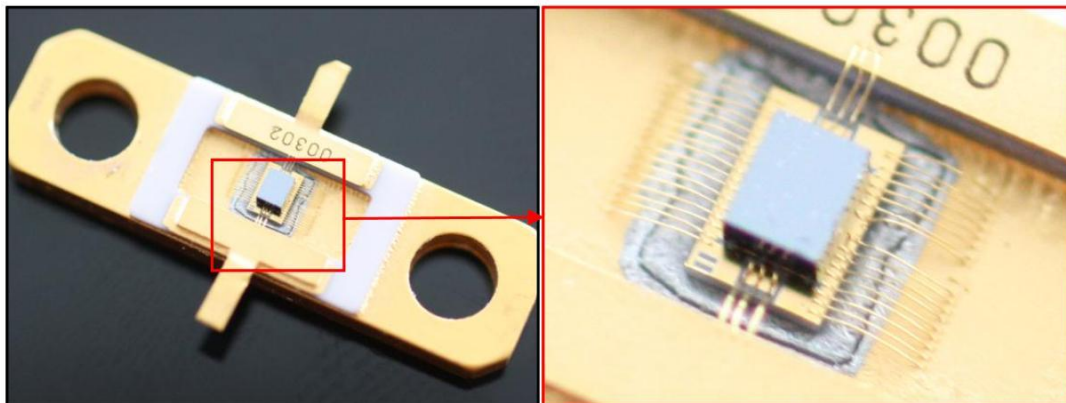


Abbildung 65: Flip-Chip aufgebaute HBT auf Träger gelötet und zusammen mit Silberleitkelber in ein Spezialgehäuse eingeklebt. Die Kontakte des Trägers sind mit Golddrähten an das Gehäuse gebondet.

wurden dann in Betrieb unter einem Mikroskop mit einer infrarotempfindlichen CCD-Kamera untersucht (Abbildung 66).

Die Elektrolumineszenzuntersuchungen erfolgten folgendermaßen: Die flip-chip aufgebauten Mehrfinger-HBTs wurden bei einer Kollektorspannung von 3 V und einer verhältnismäßig niedriger Kollektorstromdichte von $J_C = 3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ bei einer Junction-Temperatur von $T_J = 250 \text{ °C}$ beschleunigt gealtert. Die niedrige Stromdichte wurde gewählt, um leichter die Entstehung und Ausbreitung von Versetzungen zu untersuchen. Vor und während der Alterung wurden die belasteten HBTs unter einem Mikroskop mit einer IR-sensitiven CCD-Kamera untersucht. Die HBTs wurden so betrieben, dass nur eine Diode „leuchtete“. Zunächst wurde die Emitter-Basis-Diode mit $U_{BE} = 1,3 \text{ V}$ betrieben, wobei der Kollektor offen gelassen wurde. Danach wurde entsprechend die Basis-Kollektor-Diode mit $U_{BC} = 1,3 \text{ V}$ und offenem Emitter betrieben. Nach jedem Schritt wurden entsprechend Aufnahmen von der Elektrolumineszenz der HBTs gemacht (Abbildung 67) und die Alterung wurde dann fortgesetzt.

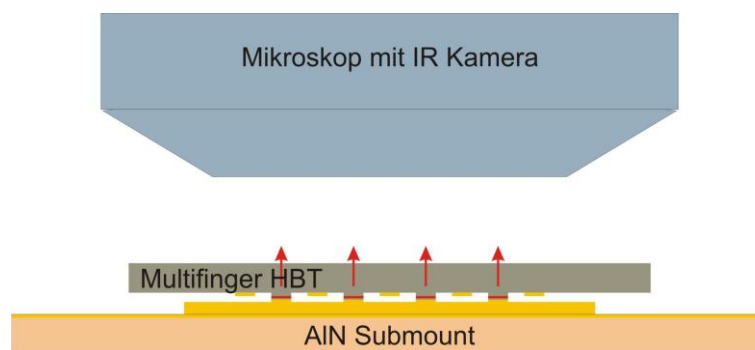


Abbildung 66: Schematische Darstellung des flip-chip Aufbaus von Multifinger-HBTs für Elektrolumineszenzuntersuchungen.

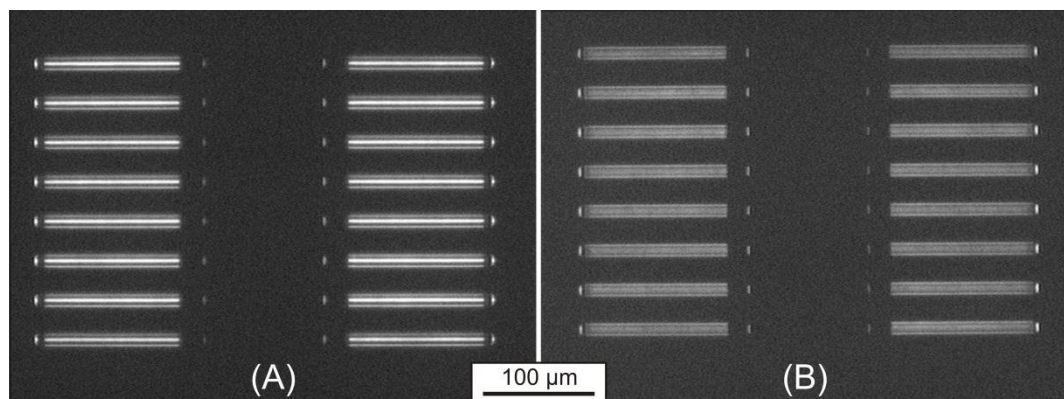


Abbildung 67: Elektrolumineszenzaufnahmen im IR-Bereich von Mehrfinger-GaAs-HBT bei Betrieb der Basis-Emitter-Diode (A) und offenem Kollektor und bei Betrieb der Basis-Kollektor-Diode (B) bei offener Basis.

In Abbildung 67 ist eine Übersicht des gesamten Transistors – bei eingeschalteter Basis-Emitter-Diode (A) und eingeschalteter Basis-Kollektor-Diode – dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in der Basis-Emitter-Schaltung das leuchtende Gebiet schmäler ist als die Basis-Kollektor-Schaltung. Die beiden leuchtenden Streifen an jedem Emitterfinger des Transistors sind Reflexionen der emittierten Photonen an den Basiskontaktmetallen.

In Abbildung 68 sind IR-Aufnahmen eines Ausschnittes desselben Bereichs eines HBT's vor und nach 800 Stunden Alterung dargestellt. Der HBT war nicht ausgefallen und die Stromverstärkung war nach dieser Zeit nur um 15% gefallen. In (A) ist ein ausgewählter Bereich des Transistors bei eingeschalteter Basis-Emitter-Diode vor der Alterung und in (B) nach 800 Stunden Belastung abgebildet (Abbildung 68). In (C) ist derselbe Bereich bei eingeschalteter Basis-Kollektor-Diode nach 800 Stunden Alterung abgebildet. In (B) ist am oberen Rand des Emitterfingers eine dunkle Linie (*englisch*: „dark line defect“, DLD) zu sehen (siehe Abschnitt IV.3.1.2). Diese Linie ist die Folge der Entstehung von Defekten bzw. Versetzungen an dieser Stelle. Dort findet eine nicht-strahlende Rekombination von Ladungsträgern über Energiezustände in der Bandlücke statt. Deshalb scheint dieser Bereich im EL-Bild dunkel. Diese Defekte sind in diesem Fall in der Basis-Emitter-Diode an der p-n-Grenzfläche entstanden, da die dunkle Linie in der Basis-Kollektor-Diode nicht auftritt (C).

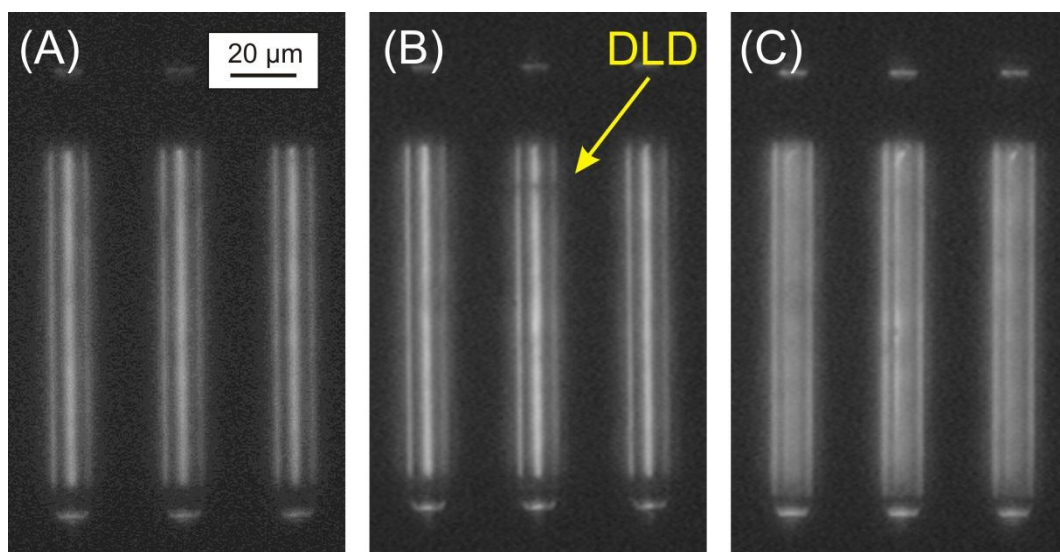


Abbildung 68: Elektrolumineszenzaufnahmen von Multifinger-HBT: (A) Basis-Emitter-Diode vor der Alterung, (B) Basis-Emitter-Diode und (C) Basis-Kollektor-Diode des gleichen Bereichs in (B) nach über 800 h Alterung bei $U_{CE}=3V$, $I_C=2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, $T_J=250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Defektentstehung wurde durch die Degradationsmechanismen während der graduellen Degradation hervorgerufen, die zu der Abnahme der Stromdichte um 15%, jedoch noch nicht zur katastrophalen Degradation geführt hat. Um den Degradationsprozess zu beschleunigen, wurde die Alterung eines weiteren HBTs bei hoher Kollektorstromdichte ($J_C = 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$) und entsprechend hoher Junction-Temperatur $T_J = 330 \text{ °C}$ durchgeführt (Abbildung 69). Abgebildet ist nur eine von zwei Fingerreihen, da in der anderen keine Defekte beobachtet wurden. Zu Beginn war zwar in einem Finger ein Defekt zusehen (A), der mit der Zeit –nach 25 bzw. 65 h – weiter wuchs (B, C), aber bei 25 h waren keine weiteren Defekte entstanden. Nach 65 h Belastung waren viele weitere Defekte zu beobachten und die Stromverstärkung war deutlich auf etwa 50% gefallen. Es wurde eine Ausbreitung in die benachbarten Emitterfinger beobachtet (Abbildung 69C). Dies ist ein Zeichen dafür, dass die entstandenen Defekte sich mit der Zeit sich ausdehnen und eine bevorzugte Ausbreitungsrichtung besitzen, die hier senkrecht zu den Emitterfingern verläuft.

Nach Langzeitalterung eines Mehrfinger-HBTs und dem Eintreten der katastrophalen Degradation wird sogar ein Wachsen der Versetzung in die Basis-Kollektor-Diode beobachtet (Abbildung 70). Zusätzlich kann man bei Mehrfinger-

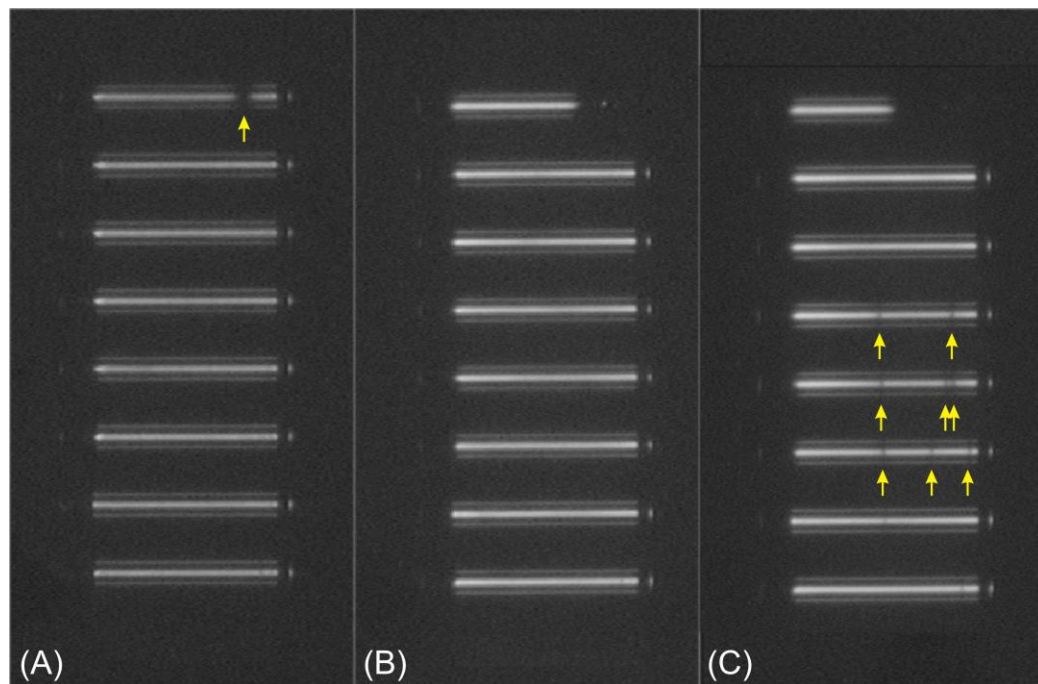


Abbildung 69: Elektrolumineszenz der Basis-Emitter-Diode einer Fingerreihe eines Multi-finger-HBTs: Defektentstehung und -weiterentwicklung nach 10, 25 und 65 Stunden Belastung bei $U_{CE}=3V$, $I_C=4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, $T_J=330 \text{ °C}$.

transistoren, deren Finger in einer sogenannten Fischgrätenform – also in zwei Gruppen – angeordnet sind (Abbildung 70), beobachten, dass in der Gruppe mit dem ersten sichtbaren DLD sich rasch weitere Versetzungen bilden. Dies weist auf eine Rückkopplung hin, die zur Entstehung und Ausbreitung der Versetzungen führt: Durch die Rekombination in der Basis wird Energie frei, die zur Entstehung von Defekten und Versetzungen führt, die wiederum selbst als Rekombinationszentren fungieren.

Elektrolumineszenz wurde bereits auch von anderen Gruppen bei GaAs HBTs für verschiedene Untersuchungen, wie zum Beispiel die Verteilung des Stroms auf die Emitterfinger von Mehrfinger-HBTs bei verschiedenen Betriebsbedingungen [Sugi02], eingesetzt [Hend94] [Harr98] [Yeat08]. Bis auf Henderson aber keine Gruppe hat eindeutig und hochaufgelöst Defekte beobachtet und sichtbar gemacht (Abbildung 62). EL ist aber auch eine gängige Methode bei der analytischen Untersuchung von Defekten in GaAs LEDs und LDs [Fush91] [Tien06].

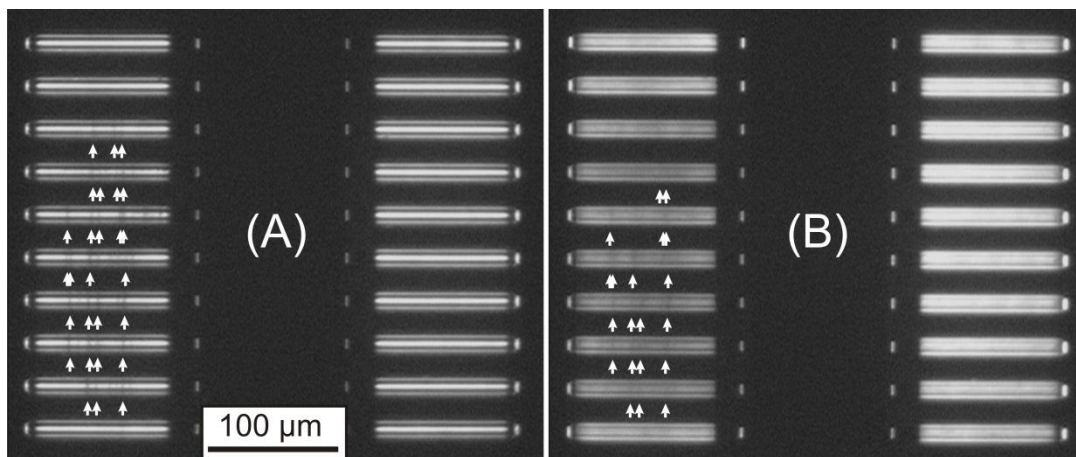


Abbildung 70: Aufnahmen der Elektrolumineszenz von der Basis-Emitter-Diode (A) und Basis-Kollektor-Diode (B) eines Multifinger-HBTs nach der katastrophalen Degradation. Es fällt auf, dass die DLDs erstens nur in der oberen Fingerreihe und zweitens sogar in der Basis-Kollektor-Diode auftreten.

V.3. Transmissionselektronenmikroskop – TEM

Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) ist eine Mikroskopiertechnik, bei der einige 100 nm dünne Proben mit einem Elektronenstrahl durchstrahlt werden. Um die gewünschte laterale Auflösung für die Untersuchung der Probe zu erreichen, werden Beschleunigungsspannungen von 80 keV bis 400 keV eingesetzt.

Kristalline Proben werden mit einem Elektronenstrahl beleuchtet, wobei die Elektronen an den Kristallebenen gebeugt und hinter der Probe in der hinteren Brennebene der Objektivlinse fokussiert werden. In dieser Ebene können mit einer Blende die gestreuten Elektronen gefiltert werden (Abbildung 71). Das Projektiv-Linsensystem wirft das vom Objektiv-Linsensystem erzeugte erste Zwischenbild weiter vergrößert auf einen Detektor mit dem die Abbildung dargestellt und gespeichert werden kann. Der dabei entstehende Kontrast wird als Beugungskontrast bezeichnet. Da hierbei die Bildintensität bei geringen lokalen Änderungen der Kristallstruktur (Neigung, Atomabstand), in der Umgebung von Kristallbaustörungen starke variiert zeigt, lässt sich damit die Realstruktur von Festkörpern untersuchen.

Durch eine Änderung des Projektivlinsensystems kann anstatt des Zwischenbildes auch die Fokusebene der Objektivlinse vergrößert abgebildet werden. Man erhält so ein Elektronenbeugungsbild, mit dessen Hilfe sich die Kristallstruktur der

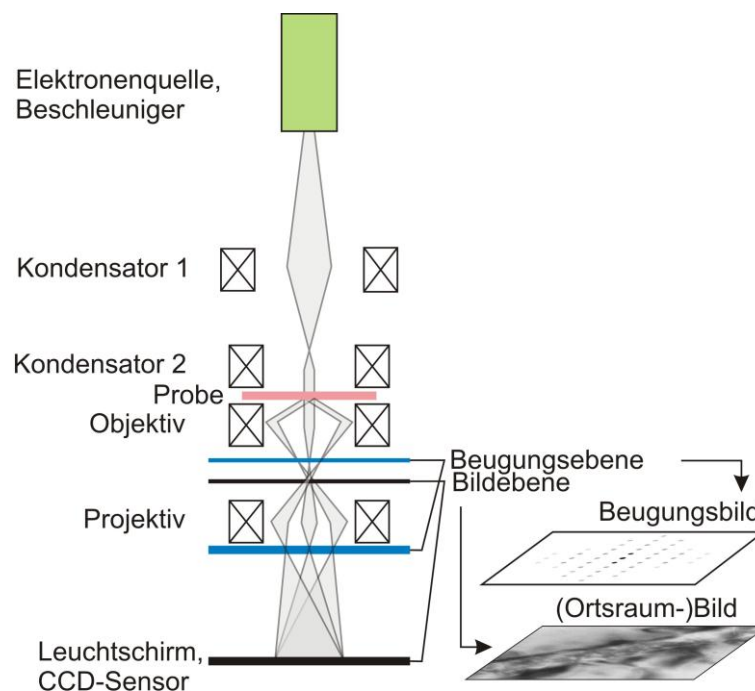


Abbildung 71: Prinzipieller Aufbau eines TEMs; Strahlengang mit Probe

Probe bestimmen lässt. Im Falle eines Einkristalls besteht das Bild aus einzelnen Punkten (Bragg-Reflexen) und dem durchgehendem Strahl. Jeder Reflex beschreibt eine Schar von parallelen Ebenen. Er entsteht durch konstruktive Interferenz von Elektronen, die an diesen Ebenen gestreut werden. Durch eine Blende in der hinteren Brennebene kann ein Bragg-Reflex ausgewählt werden. Dadurch werden im Bild nur die Bereiche dargestellt, die in diesen Reflex streuen. Beim sogenannten „Hellfeld“ wird der durchgehende Strahl ausgewählt. Beim „Dunkelfeld“ wird ein Reflex ausgewählt. Es sollte ein Reflex sein, der eine hohe Intensität besitzt, damit nach dem Ausblenden die Intensität noch hoch genug für eine Beobachtung ist (Abbildung 72).

V.3.1. Fokussierte Ionenstrahlen – FIB

Das FIB-Mikroskop (FIB, englisch: „focused ion beam“) ist ein Gerät zur Bearbeitung von Oberflächen. Dabei entsteht der Materialabtrag durch Ionenätzung (meist Gallium-Ionen). Ähnlich wie in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) kann die Oberfläche durch die beim Auftreffen der Ga-Ionen entstehenden Sekundärelektronen abgebildet werden. Der fokussierte Ga-Ionenstrahl ermöglicht das kontrollierte Abtragen bzw. Aufbringen von Materialien. Die Ionen werden typischerweise mit Spannungen von 5-50 kV beschleunigt und erreichen Stromstärken von 2 pA bis zu 20 nA. Gallium wird wegen der guten Erzeugbarkeit seiner Ionen mittels einer Flüssigmetall-Ionen-Quelle eingesetzt. Dabei wird Gallium auf einer

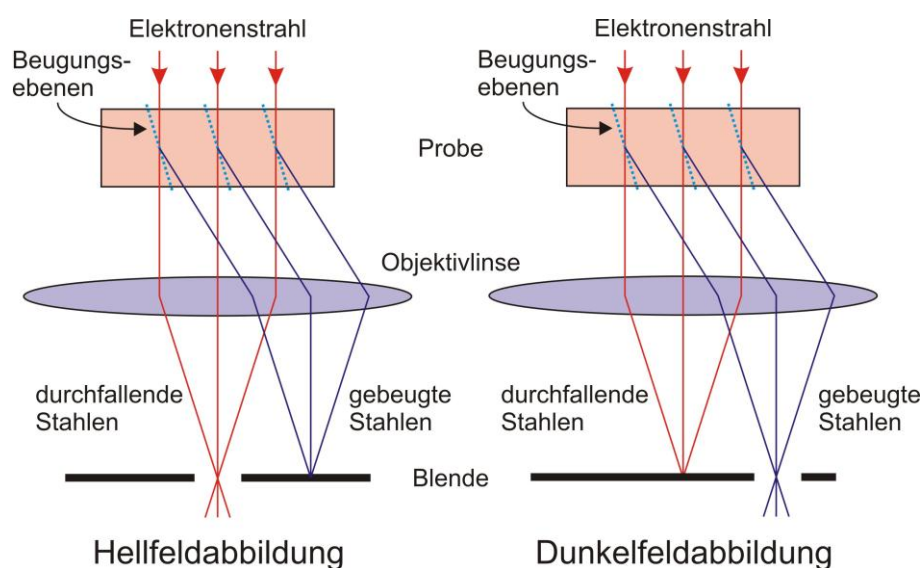


Abbildung 72: Dunkelfeld- und Hellfeld-Abbildung in TEM durch das Abblenden der entsprechenden Bragg-Reflex.

Wolframnadel bis zum Schmelzpunkt erhitzt und in einem Feldemissionsprozess der Ionenstrahl gewonnen. Die Gallium-Ionen können mithilfe elektrostatischer Felder auf einige Nanometer fokussiert werden.

In dieser Arbeit wurde die FIB vorwiegend eingesetzt, um gezielt TEM-Proben aus bestimmten Bereichen der HBTs zu präparieren (Abbildung 73). Die

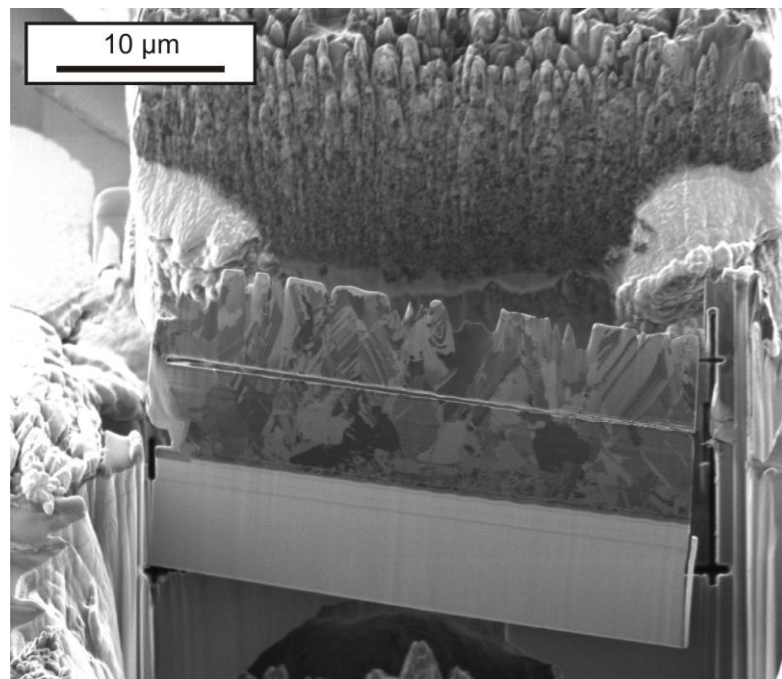


Abbildung 73: FIB-Aufnahme: Längsschnitt eines Emitterfingers präpariert für TEM-Untersuchung.

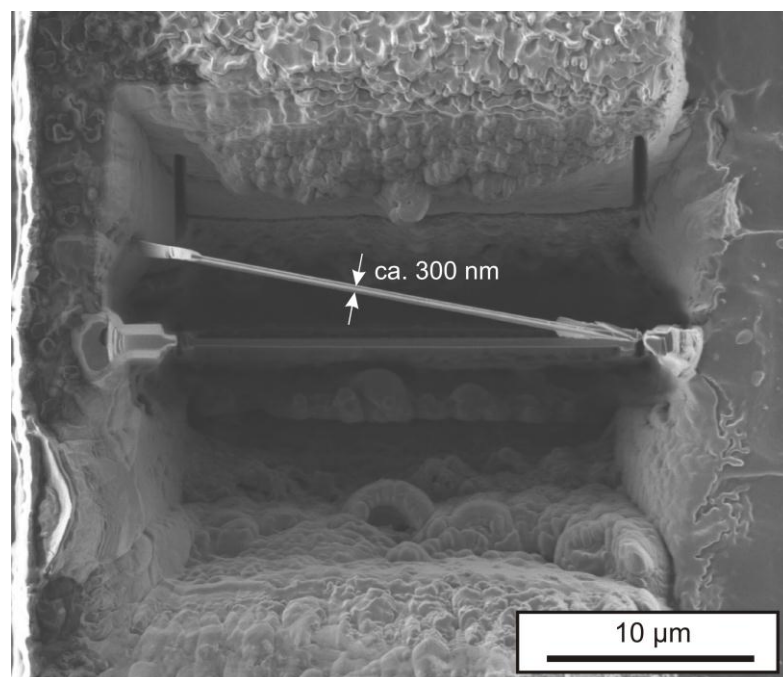


Abbildung 74: Aufsicht einer fertig präparierten TEM-Probe mit FIB. Die Probe selbst ist leicht zur Seite gekippt.

Herausforderung bei der Präparation von Proben für die TEM-Untersuchung bei sehr hohen Auflösungen liegt in der extrem geringe Zieldicke der Probe von 100-300 nm, während die Probe selbst eine Länge von 15-20 μm und eine Höhe von etwa 10 μm hat (Abbildung 74). Gleichzeitig muss die Probe für die TEM-Untersuchungen über die gesamte Länge gleichmäßig dick sein. Diese Voraussetzungen erfordern eine sorgfältige Präparation, denn neben dem Abtrag kann es beim Sputterprozess auch zur Einlagerung von Galliumatomen und zur Amorphisierung der Oberfläche kommen [Maye07]. Die Amorphisierung der Oberfläche kann nur durch behutsames Dosieren der Ionenstrahlenergie bzw. – beschleunigungsspannung vermindert werden.

V.3.2. TEM-Untersuchung der HBTs

Für die TEM-Untersuchung wurden mit der FIB durchstrahlbare Proben von neuen unbelasteten sowie von degradierten HBTs desselben Wafers präpariert (Abbildung 75). Die Lamellen aus unbelasteten Transistoren dienen als Referenz für die Untersuchung der degradierten HBTs. Dabei soll gezeigt werden, dass die Befunde in den degradierten HBTs nicht bereits vor der Alterung vorhanden waren oder durch die Präparation der TEM-Proben entstanden sind. Hierfür wurden TEM-Proben als Längs- und Querschnitte durch den Transistor präpariert. Die Querschnitte dienen zur Untersuchung der Gebiete an der Mesakante und zur Untersuchung der Bereiche unterhalb der Ohmschen Kontakte hinsichtlich der Elektromigration, die Längsschnitte dienen der Suche nach Defekten und Versetzungen.

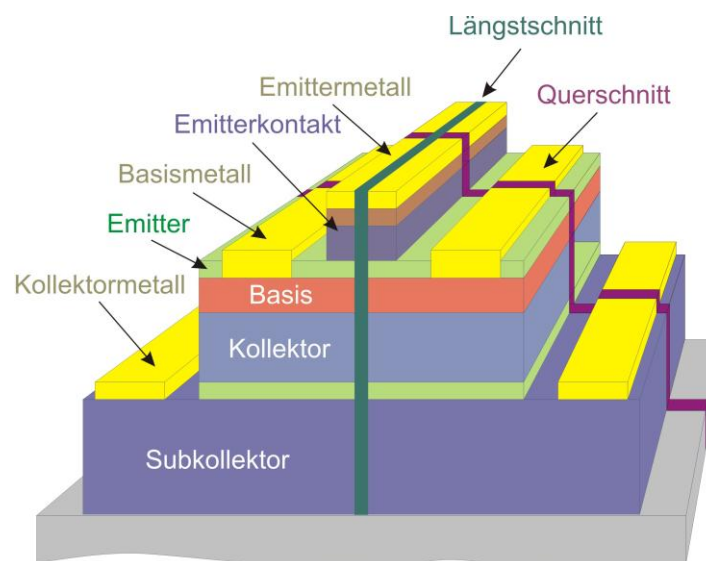


Abbildung 75: Skizze, Längs- und Querschnitte durch den Transistor

In Abbildung 76 und Abbildung 77 sind die TEM-Aufnahmen der beiden Referenzproben, jeweils ein Querschnitt (Abbildung 76) und ein Längsschnitt (Abbildung 77) durch den Emitterfinger eines HBTs abgebildet. Aufgrund der nicht sehr sauberen FIB Präparation ist die Oberfläche der Querschnittsprobe durch aufgesputtertes Gold verunreinigt. Dies belegen EDXS Untersuchungen der Probenoberfläche (Abbildung 78).

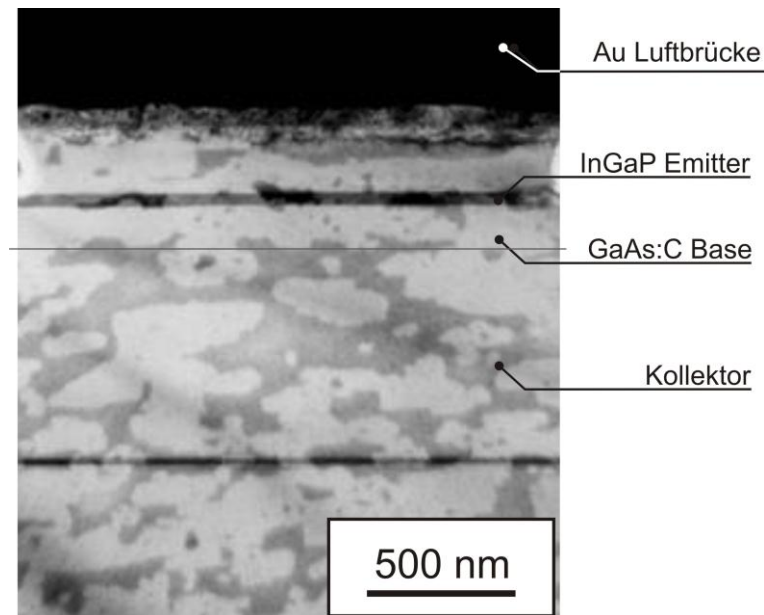


Abbildung 76: TEM Aufnahme des Querschnitts eines unbelasteten HBTs.

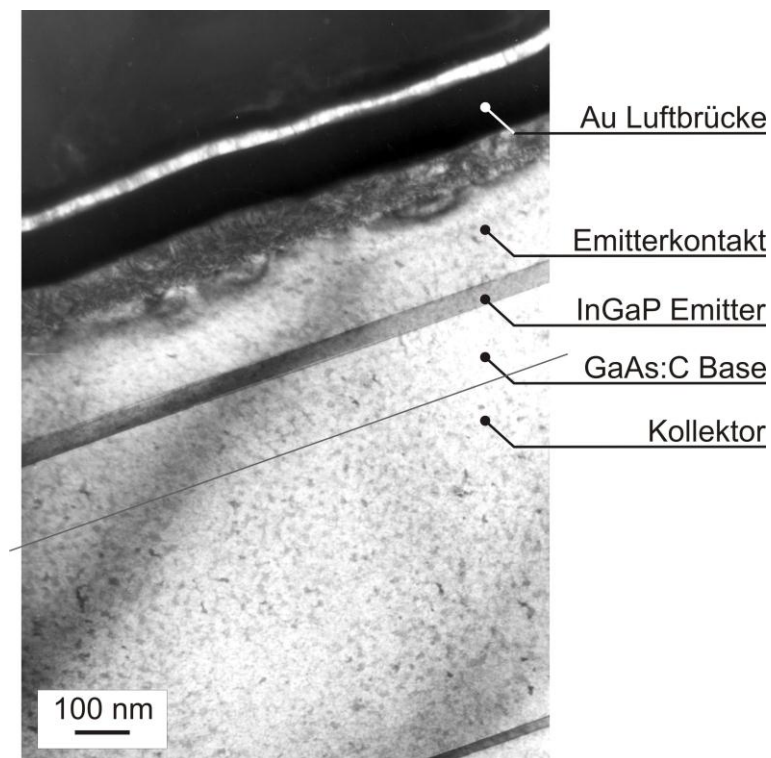


Abbildung 77: TEM Aufnahme des Längsschnitts eines unbelasteten HBTs.

Hier wurden zwei Punkte auf der Probe untersucht. Punkt A wurde direkt auf einen Fleck gelegt und Punkt B auf eine saubere Stelle der Probe. Das Ergebnis der EDXS-Untersuchung zeigt deutlich, dass während in Punkt A ein starkes Gold-Signal (Au) zu detektieren war, dieses im Spektrum des Punktes B fehlt. Die Signale von Kupfer (Cu) im Spektrum stammen vom TEM-Probenhalter, der aus Kupfer besteht.

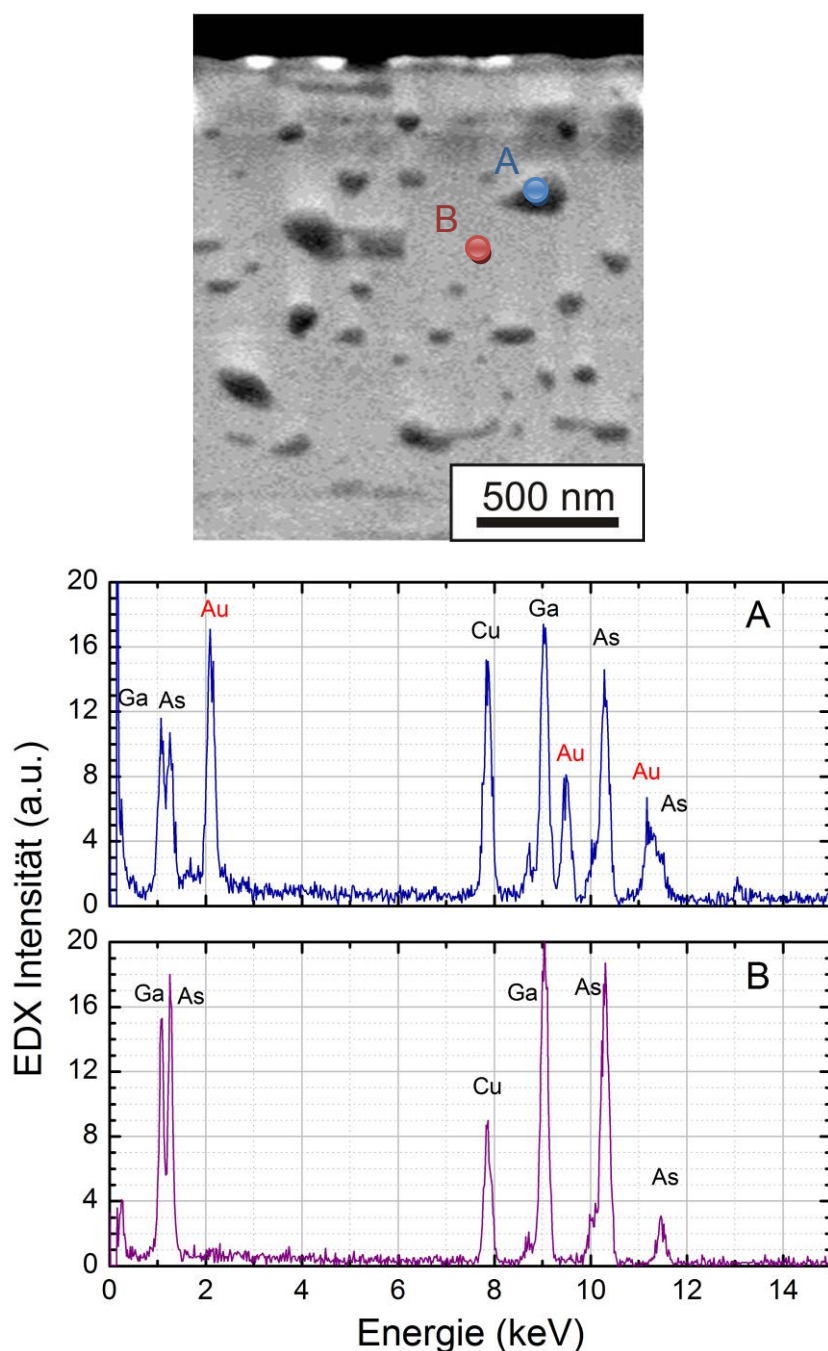


Abbildung 78: (oben) STEM Aufnahme einer unbelasteten Probe, (unten) EDX-Spektren der Verschmutzung auf der Probe (A), Vergleich mit „sauberer“ Stelle (B). Es ist deutlich zu erkennen, dass Punkt A goldhaltig ist, das während der Präparation der TEM-Probe auf die Oberfläche unabsichtlich gesputtert wurde.

Die Untersuchung der Referenzproben ergab, dass diese versetzungs- und defektfrei waren. Es wurde keine Metалldiffusion ins Halbleitermaterial oder sonstige Auffälligkeiten beobachtet.

Die für die TEM-Untersuchung ausgewählten HBTs wurden bis zur katastrophalen Degradation gealtert und dann analysiert. Zunächst wurden gezielt nach bisher berichteten Degradationsmechanismen, wie Kohlenstoffpräzipitate [Taka94] oder Metалldiffusion ins Halbleitermaterial [Liu98], gesucht. Danach wurden die in den Proben beobachteten Defekte und Versetzungen untersucht und charakterisiert.

V.3.3. Defekte und Versetzungen

Bei der Untersuchung der TEM-Proben von degradierten HBT's – sowohl im Querschnitt (Abbildung 79) als auch im Längsschnitt (Abbildung 80) wurden dagegen Versetzungen nachgewiesen. In beiden Aufnahmen ist deutlich zu sehen, dass die Versetzungen von der Basis-Emitter-Grenzfläche ausgehen und sich im Bauelement ausbreiten. In der Querschnittsaufnahme (Abbildung 79) ist zu erkennen, dass die Versetzungen verstärkt in der Mitte des Emitterfingers auftreten, wo die Verlustleistung und somit auch die Temperatur am höchsten sind und die Defektentstehung und -ausbreitung in diesem Bereiche beschleunigen.

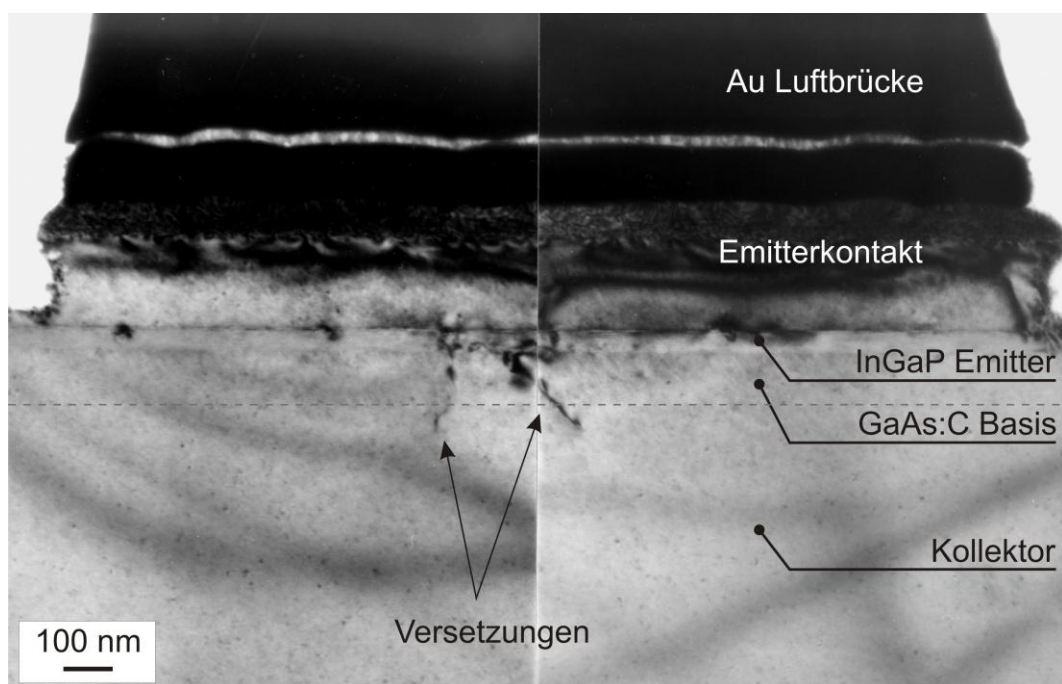


Abbildung 79: TEM-Aufnahme vom Querschnitt eines degradierten HBTs. Versetzungen treten insbesondere in der Mitte des Emitters im Bereich der höchsten Stromdichte auf.

In der Längsschnittaufnahme (Abbildung 80) ist gut zu sehen, wie sich Versetzungen vom Emitter ausgehend wie Schleifen (Loops) bis in den Kollektor ausbreiten. Dabei ist an der linken Seite zu sehen, wie die Versetzung an der Basis-Kollektor-Grenzfläche (gestrichelte Hilfslinie) anscheinend „hängt“. Weitere Aufnahmen von Längsschnitten anderer TEM-Proben eines degradierten HBTs zeigen, dass die Versetzungen bis tief in den Kollektor eindringen können (Abbildung 81).

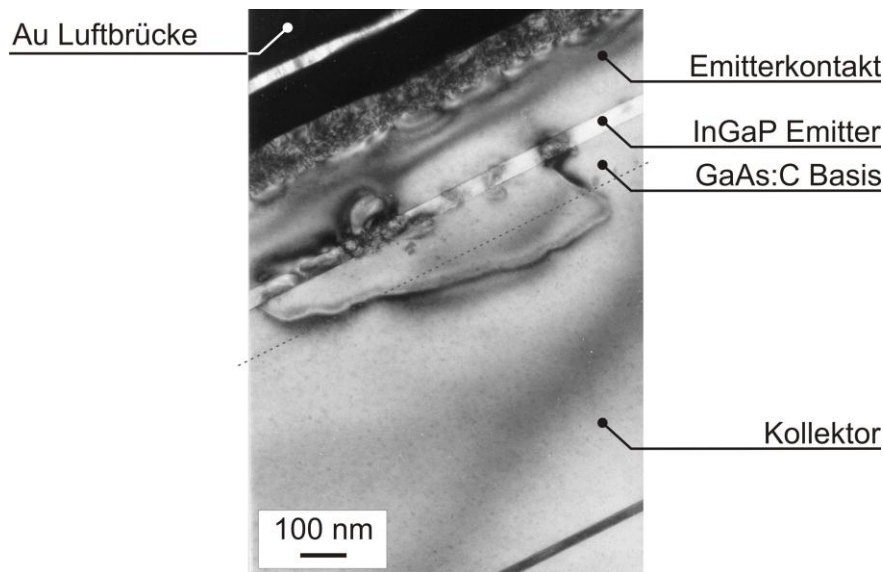


Abbildung 80: TEM-Aufnahme vom Längsschnitt eines degradierten HBTs. Es ist besonders gut zu sehen, dass die Versetzungen von der Emitterbasisgrenzfläche ausgehen und sich ausbreiten. (Längsschnitt, links).

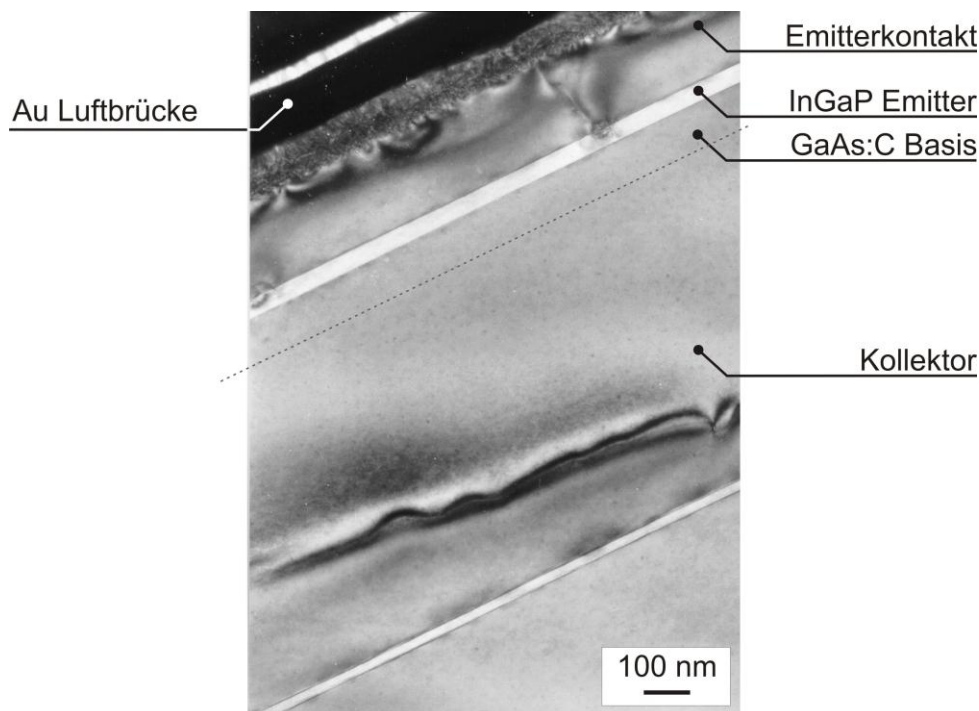


Abbildung 81: TEM Aufnahme von Versetzungen im Längsschnitt eines degradierten HBTs; Versetzung tief im Kollektor

Das Eindringen der Versetzungen bis in den Kollektor tritt bei HBTs auf, die einen „totalen“ Ausfall des Transistors zeigten – also soweit, bis die Stromverstärkung kaum noch sinkt (Abbildung 82). Die Entwicklung der Versetzungen in der Basis und deren Ausbreitung bis in den Kollektor wurden auch durch Messung von Gummel-Plots der HBTs während der Alterung nachgewiesen. In den Abbildungen

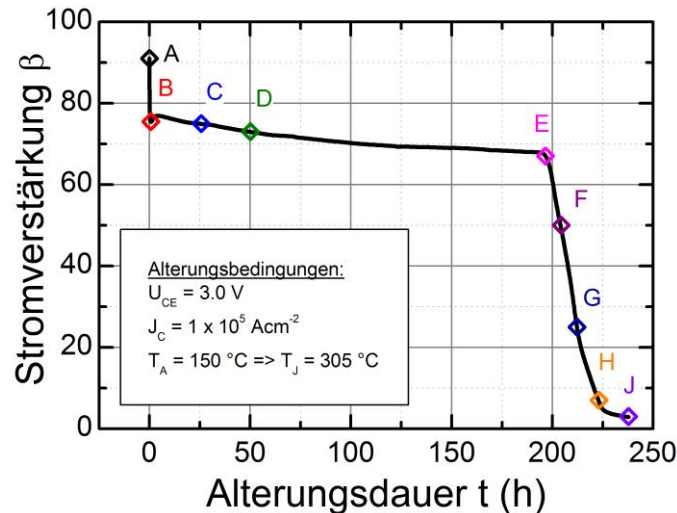


Abbildung 82: Alterungsverlauf eines GaAs HBTs zur Untersuchung der Änderung der elektrischen Eigenschaften (Gummel-Plot) während der Alterung (Abbildung 83).

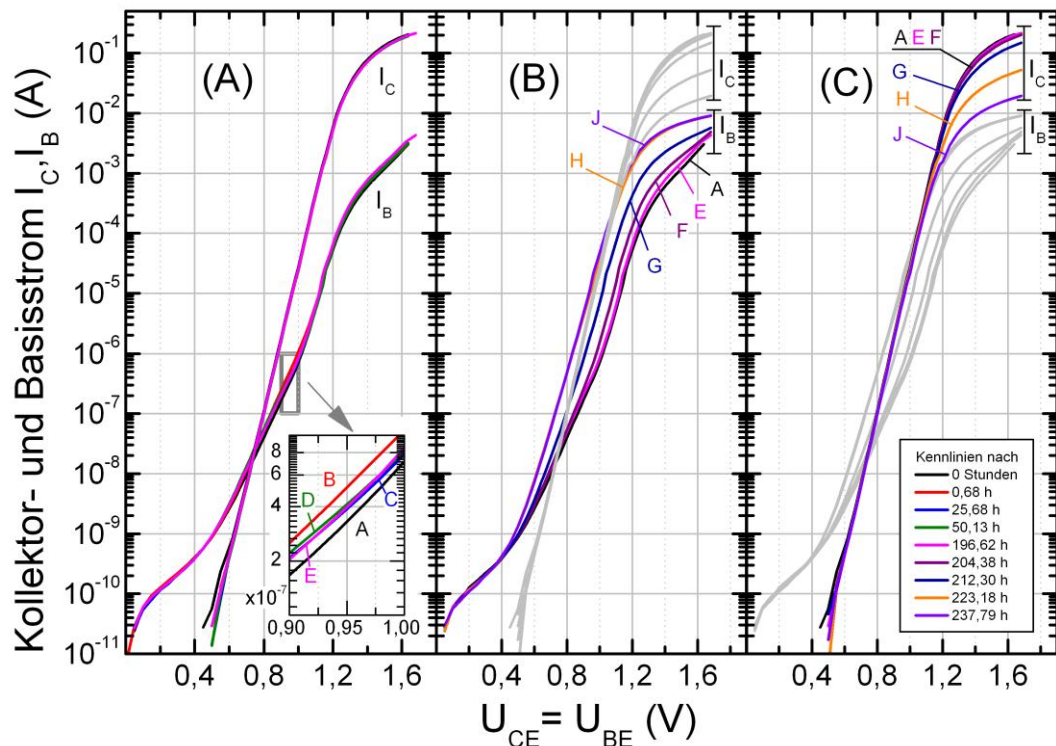


Abbildung 83: Änderungen des Gummel-Plots während der Alterung: vom Start bis vor Beginn (A) und nach Beginn (B+C) der katastrophalen Degradation. Die Diagramme B und C sind identisch, in B wurden die Basisströme und in C die Kollektorströme farblich hervorgehoben. Die Punkte im Alterungsverlauf (Abbildung 82) zeigen den Zeitpunkt der Messung an.

82 und 83 sind die Ergebnisse dargestellt. In Abbildung 82 ist der Alterungsverlauf dargestellt und der Zeitpunkt der Gummel-Plot-Messungen markiert. Die Ergebnisse der Gummel-Plot-Messungen sind in der Abbildung 83 dargestellt. Die Farben der Kurven entsprechen den Farben der Markierungen in Abbildung 82.

Betrachtet man in Abbildung 83A die Änderungen des Gummel-Plots während den ersten Stunden der Alterung, so erkennt man, dass es nur zu einer kleinen Drift des Basisstroms kommt, während der Kollektorstrom gleich bleibt. Die größte Veränderung des Basisstroms im Gummel-Plot ist zunächst zwischen der Messung vor Beginn der Alterung (Kurve A, schwarz) und direkt nach dem starken Abfall der Stromverstärkung im Minimum des Burn-in's (Kurve B, rot) zu erkennen. Nach dem Burn-in nähert sich der Verlauf des Basisstroms im Gummel-Plot der Ausgangskurve (Kurve C, blau und Kurve D, grün) und ändert sich bis zum Beginn der katastrophalen Degradation kaum (Kurve E, pink). Bei allen Messungen ist keine Drift des Kollektorstroms sichtbar.

In Abbildung 83B und C sind die Gummel-Plots nach Einsatz der katastrophalen Degradation dargestellt. Für eine bessere Darstellung wurden in Abbildung 83B die Basisströme und in 83C die Kollektorströme farblich dargestellt. Als Referenz ist die Messkurve vor Beginn der Alterung (Kurve A, schwarz) mit abgebildet. In Abbildung 83B ist die geringe Abweichung des Basisstroms kurz vor Einsatz der katastrophalen Degradation gut zu erkennen. Erst nach Einsatz der katastrophalen Degradation beginnt der Basisstrom im Gummel-Plot zu steigen bis die Abnahme der Stromverstärkung sich verlangsamt (Abbildung 82). Zwischen den Messungen zum Schluss der Alterung – H, orange und J, violett – ändert sich der Basisstrom nicht. Genau gegensätzlich verhält sich der Kollektorstrom (Abbildung 83C). Eine Änderung des Kollektorstromverlaufs im Gummel-Plot ist erst zum Schluss der Alterung zu erkennen. Die Messung in Punkt G (dunkelblau) weicht nur geringfügig von den vorhergehenden ab, die darauf folgenden zeigen aber eine deutlich Abnahme des Kollektorstroms mit der Dauer der Alterung (H, orange und J, violett).

Die Zunahme des Basisstroms ist mit der Entstehung und Ausbreitung der Versetzungen in der Basis und der damit verbundenen Zunahme an Rekombinationsstrom zu erklären, der einen Verluststrom darstellt und nicht zur Stromverstärkung beiträgt, wodurch diese abnimmt. Die Abnahme des maximalen Kollektorstroms am Ende der Alterung kann mit der Entstehung von Defekten im Kollektor

oder auch mit dem Eindringen der Versetzungen aus der Basis in den Kollektor erklärt werden, die zur Erhöhung des Kollektorwiderstandes und damit zur Verringerung des maximalen Kollektorstroms führen.

V.3.4. Burgers-Vektor-Analyse

Versetzungen werden durch zwei Größen charakterisiert: die Versetzungslinie und den Burgersvektor $\vec{b}$ [Hirt82] [Hull84]. Der Einheitsvektor in Versetzungslinienrichtung kennzeichnet die räumliche Lage der Versetzung im Kristall. Der Burgersvektor beschreibt die Richtung und Art der lokalen Kristalldeformation. Bestimmt wird er durch den sogenannten Burgersumlauf, man vollführt dabei im ungestörten und gestörten Kristallgebiet einen geschlossenen Umlauf, die Differenz in Länge und Richtung beider Umläufe entspricht dem Burgersvektor (Abbildung 84).

Zur Bestimmung des Burgersvektors der Versetzungen wird die Probe im TEM untersucht. Versetzungen in Kristallen werden in TEM deshalb sichtbar, da sie Störungen der periodischen Kristallstruktur darstellen und dort die Bragg'sche Beugungsbedingung schlechter oder gar nicht erfüllt wird. Dadurch werden die Versetzungen durch Helligkeitsunterschiede sichtbar. Orientiert man den Kristall nun so, dass nur eine Ebenenschar die Braggbedingung erfüllt, so erreicht man die maximale Helligkeitsvariation durch die Versetzungen, die in dieser Ebene vorhanden sind. Diese sind die Ebenen, deren Normale $\vec{g}$ parallel zum Burgersvektor $\vec{b}$ liegt. Liegt die abbildende Ebenenschar senkrecht zum Burgersvektor, wird der

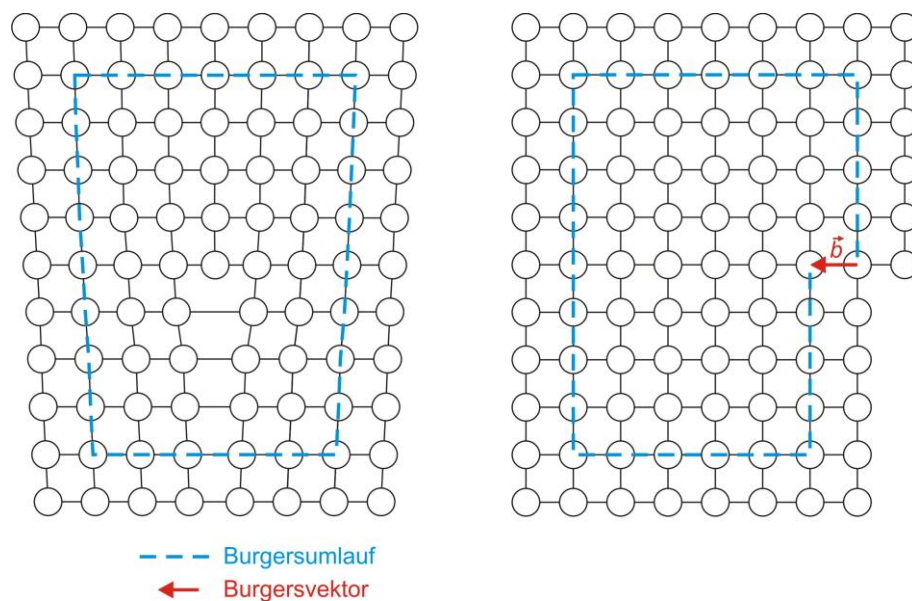


Abbildung 84: Skizze zur Veranschaulichung der Bestimmung des Burgersvektors.

Kontrast minimal:

$$\vec{g} \cdot \vec{b} = 0.$$

Stellt man nun unterschiedliche $\vec{g}$ ein, so lässt sich der Burgersvektor $\vec{b}$ bestimmen.

Abbildung 85 ist die TEM-Aufnahme des Längsschnitts eines degradierten HBTs. Hier sind Versetzungen zu sehen, die vom Emitter des HBTs ausgehen. Um

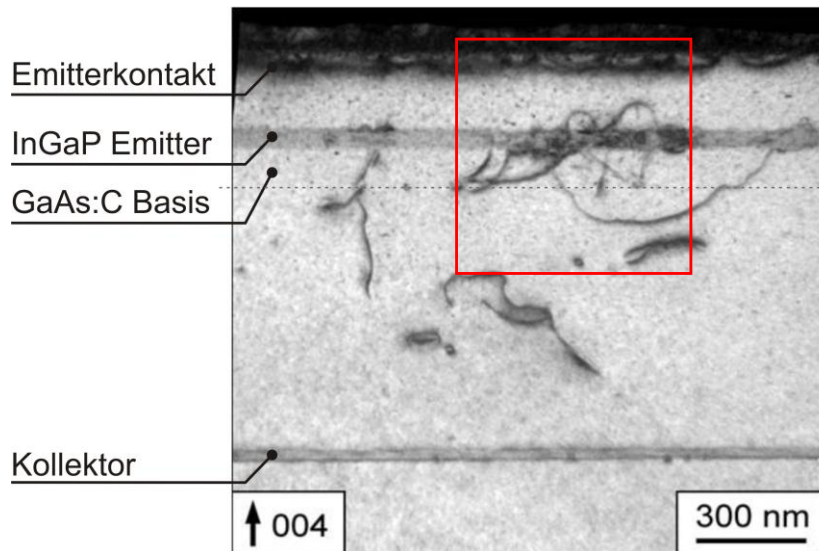


Abbildung 85: TEM-Hellfeldaufnahme der zu untersuchenden Versetzungen.

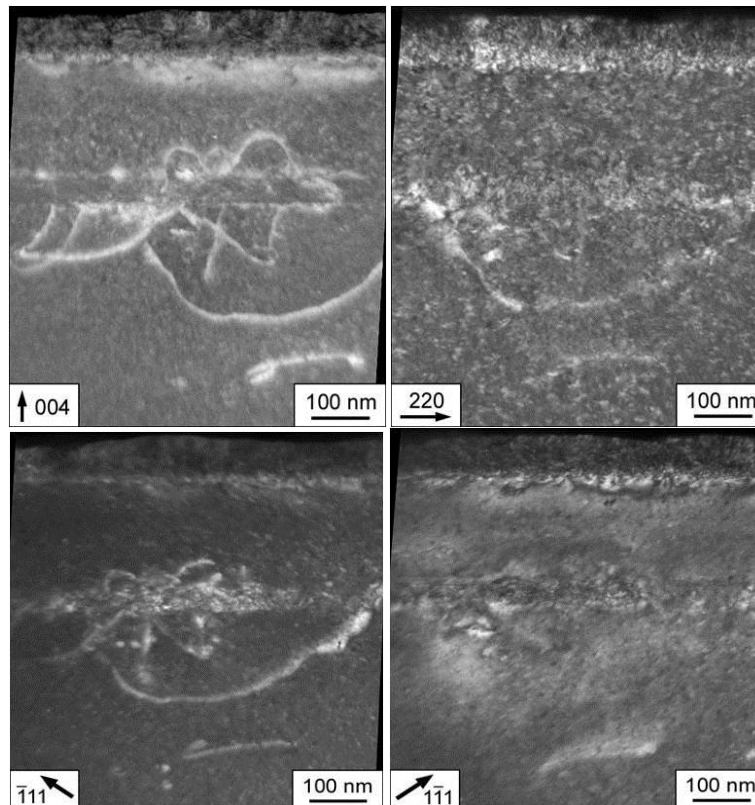


Abbildung 86: TEM Dunkelfeldaufnahmen von Versetzung bei unterschiedlichen Bragg-Reflexen.

den Burgersvektor der Versetzungen zu bestimmen, wurden Aufnahmen der Versetzungen unter verschiedenen Beugungsbedingungen durchgeführt (Abbildung 86). Man kann deutlich erkennen, dass die Versetzungen für die Beugungsvektoren $\vec{g} = 004$ und $\vec{g} = \bar{1}11$ sehr gut sichtbar sind, während sie für $\vec{g} = 220$ und $\vec{g} = 1\bar{1}1$ nicht mehr zu erkennen sind. Dies bedeutet, dass die Normalen der Ebenen senkrecht zum Burgersvektor der Versetzungen sind und somit liegt ausreichend Information vor, um diesen zu berechnen. Aus dem Vektorkreuzprodukt der beiden Ebenennormalen und nachfolgender Normierung ergibt sich somit für den Burgersvektor:

$$\vec{b} = \frac{1}{6} [\bar{1}12]$$

Der bestimmte Burgersvektor unterscheidet sich von den bisher berichteten Vektoren für die Versetzungen im GaAs-Bauelementen [Take92]. Die wahrscheinlichsten Burgersvektoren in GaAs sind vom Typ $\frac{a}{2} \langle 110 \rangle$ [Amon99]. Die beobachteten Versetzungen sind Mischtypen und ihr Burgersvektor ist entsprechend zusammengesetzt aus verschiedenen Burgersvektoren, wie zum Beispiel $\frac{a}{2} [011]$ und $\frac{a}{2} [10\bar{1}]$ [Amon99].

V.4. Materialdiffusion

V.4.1. Energiedispersive Röntgenspektroskopie – EDX

Energiedispersive Röntgenspektroskopie EDXS (englisch: energy dispersive X-ray spectroscopy) ist eine Methode zur Ermittlung von Elementzusammensetzung von Materialien. Die Atome in der Probe werden dazu mit einem Elektronenstrahl angeregt und senden charakteristische Röntgenstrahlung mit einer element-spezifischen Energie aus. Dabei wird ein Elektron aus der Atomhülle aus einem der niedrigeren Energiezustände herausgeschlagen, dessen Zustand von einem Elektron aus einem höheren Zustand besetzt wird. Die überschüssige Energie des Elektrons kann durch ein Photon (Röntgenquant) emittiert werden. Die Energie dieses Röntgenquants ist ein Indikator dafür, um welches Element es sich handelt. Diese Spektroskopie wird in Verbindung mit TEM Untersuchungen angewendet, um lokale Materialanalysen durchzuführen.

V.4.2. Metaldiffusion in den Halbleiter

Die Degradation der Metallkontakte bzw. der ohmschen Kontakte ist thermisch aktiviert und tritt auch bei anderen Transistortypen auf. Die möglichen Degradationsmechanismen bestehen einerseits in einer Erhöhung des Kontaktwiderstandes oder in der Diffusion von Metallatomen in das Halbleitermaterial [Liu98], was sogar zum Kurzschluss zwischen Basis und Emitter führen kann. Als ohmscher Kontakt für den Emitter wird überwiegend Ti/Pt/Au- und für die Basis eine Pt/Ti/Pt/Au-Legierung verwendet. Diese Legierung ist niederohmig und lässt sich gleichzeitig leicht herstellen. Die Titanschicht im Pt/Ti/Pt/Au-Basiskontakt soll die Diffusion von Gold in die GaAs-Schicht vermeiden.

Die Ohmschen Kontakte sind mögliche Ursachen für die Degradation von HBTs. Das Kontaktmetall kann in den Halbleiter diffundieren und zum Kurzschluss führen. Um die Stabilität der Metallkontakte zu überprüfen, wurde bei einem degradierten HBT die Materialzusammensetzung (Pt/Ti/Pt/Au) in der Umgebung des Basismetallkontakts in TEM untersucht (Abbildung 87). Aufgrund der Anforderungen an die Hochfrequenzeigenschaften der HBTs wurde die Basis möglichst dünn (≈ 90 nm) hergestellt, um die Transferzeit der Elektronen zu verringern. Daher könnte die Diffusion von Kontaktmetall in die Basis sehr schnell zu einem Kurz-

schluss mit der Kollektorschicht – und somit zum Ausfall des HBT's – führen.

In Abbildung 87 ist zunächst eine Übersichtsaufnahme (oben links) des HBTs mit der Emittiermesa in der Mitte und den beiden Basiskontakten rechts und links zu sehen. Die Scanning-TEM-Aufnahme (oben Mitte) zeigt den linken Rand des rechten Basiskontakts. Dieser Bereich ist von besonderem Interesse, da eine Metalleitdiffusion zu einem Basis-Emitter- oder Basis-Kollektor-Kurzschluss führen kann. Die farbigen Punkte sind die Stellen, an denen die Materialanalyse mit EDXS durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der Analysen sind in den gleichen Farben wie die Punkte in der STEM-Aufnahme dargestellt. Die untersuchten Bereiche sind im Uhrzeigersinn: Basismetall (rot), Basiskontakt (blau und braun), Basis (Magenta) und Emitter (grün). Im Emitter (grün) und in der Basisschicht (Magenta) sind keine Spuren von Metall entdeckt worden. Der Basiskontakt aus Pt/Ti/Pt/Au ist so konzipiert, dass eine Golddiffusion durch das vorhandene Titan unterbunden wird. Dies ist hier sehr gut gezeigt worden. Daher ist Elektromigration für die am FBH hergestellten HBTs kein Degradationsmechanismus.

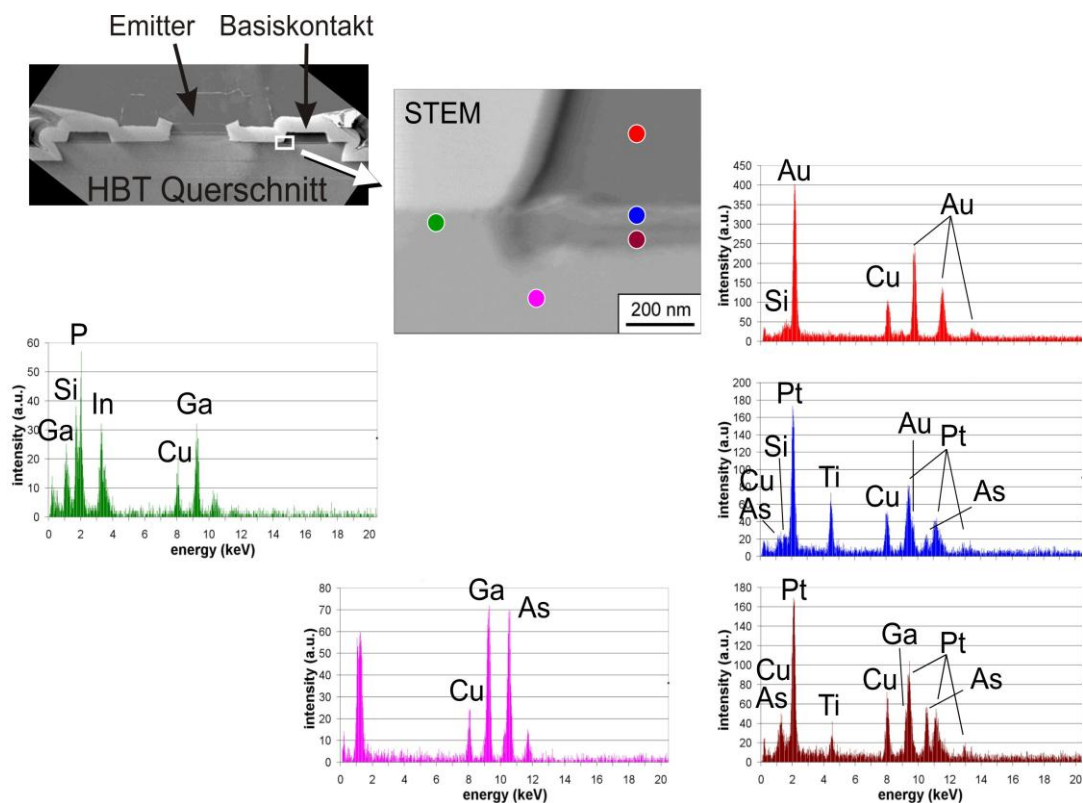


Abbildung 87: Untersuchung des ohmschen Kontakts der Basis eines degradierten HBTs. Die Untersuchung mit EDXS zeigt keine Diffusion von Metall in das Halbleitermaterial.

V.4.3. Kohlenstoffpräzipitate

Takahashi et al. [Taka94] haben in ihrer Publikation degradierte Transistoren einer Strukturanalyse im TEM unterzogen. Dabei wurden Kohlenstoffpräzipitate beobachtet, die sich in der Basis-Emitter-Grenzfläche in der Nähe der Mesakante gebildet hatten (Abbildung 88). Diese Präzipitate haben einen Durchmesser von 10-15 nm, EDX-Untersuchungen haben bestätigt, dass sie kohlenstoffhaltig sind. Daher haben Uematsu et al. vorgeschlagen, dass die rekombinationsbeschleunigte Fremdatomdiffusion REID (*englisch*, „Recombination Enhanced Impurity Diffusion“) ein möglicher Mechanismus für die Bildung der Präzipitate ist [Uema91]. Daher wird die von REID ausgelöste Degradation durch eine Zunahme von Rekombinationszentren in der Raumladungszone während des Betriebs begleitet, die zu einer gleichzeitigen Zunahme des Basisstroms und der Verminderung der Stromverstärkung führt.

Die Untersuchung der Querschnittsprobe des degradierten HBTs in der Nähe der Mesakante in TEM brachte keine Erkenntnisse über Kohlenstoffpräzipitate (Abbildung 89). Es erfolgte zwar keine Materialanalyse, jedoch sind optisch in den Aufnahmen keine auffälligen Erscheinungen sichtbar. Dabei unterscheiden sich HBTs von denen aus [Taka94] nur durch das Emitttermaterial – InGaP im Falle FBH bzw., AlGaAs bei Takahashi. Die Basisdotierungshöhe ist in beiden Fällen gleich. Takahashi belastete die Transistoren bei niedrigerer Stromdichte ($J_C = 6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$) im Vergleich zu $J_C = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ in dieser Arbeit.

Yang et al. sehen den Grund für das Auftreten der Präzipitate in der Wachstumstemperatur des Emitters und der Emittterkontaktschicht. Das Aufwachsen der Emittterkontaktschicht bei hohen Temperaturen ($> 600 \text{ }^\circ\text{C}$), das nach dem Wachstum der Basisschicht erfolgt, führt zu Entstehung von Kohlenstoffkomplexen [Yang00]. Während des Temperns wechseln einige Kohlenstoffatome von Gitter- auf Zwischengitterplätze und sind als Akzeptor nicht mehr verfügbar. Dieser Prozess verringert die aktive Kohlenstoffkonzentration und die Löcherkonzentration in der Basis. Die Kohlenstoffatome können nun Präzipitate bilden oder als Defekte in der Basis zur Rekombinationsstrom und zur Abnahme des Stromverstärkung führen. Die thermisch induzierte Entstehung der Kohlenstoffkomplexe in Zusammenhang mit dem Verlust an Kohlenstoffakzeptoren wurde von Wagner et al. mit Hilfe

von Raman-Messungen abgeleitet [Wagn97]. Durch die entsprechende Änderung der Wachstumsparameter und Erhöhung der Schichtqualität kann dieser Effekt unterdrückt und die Entstehung der Kohlenstoffpräzipitate vermieden werden [Brun02].

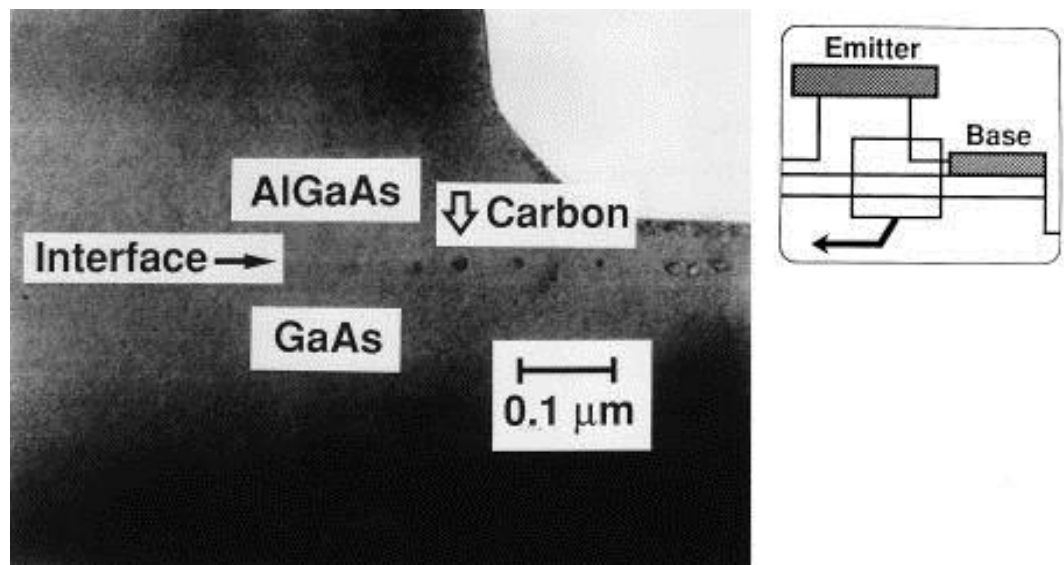


Abbildung 88: Kohlenstoffpräzipitate in der Basisschicht Nahe der Mesakante [Taka94]

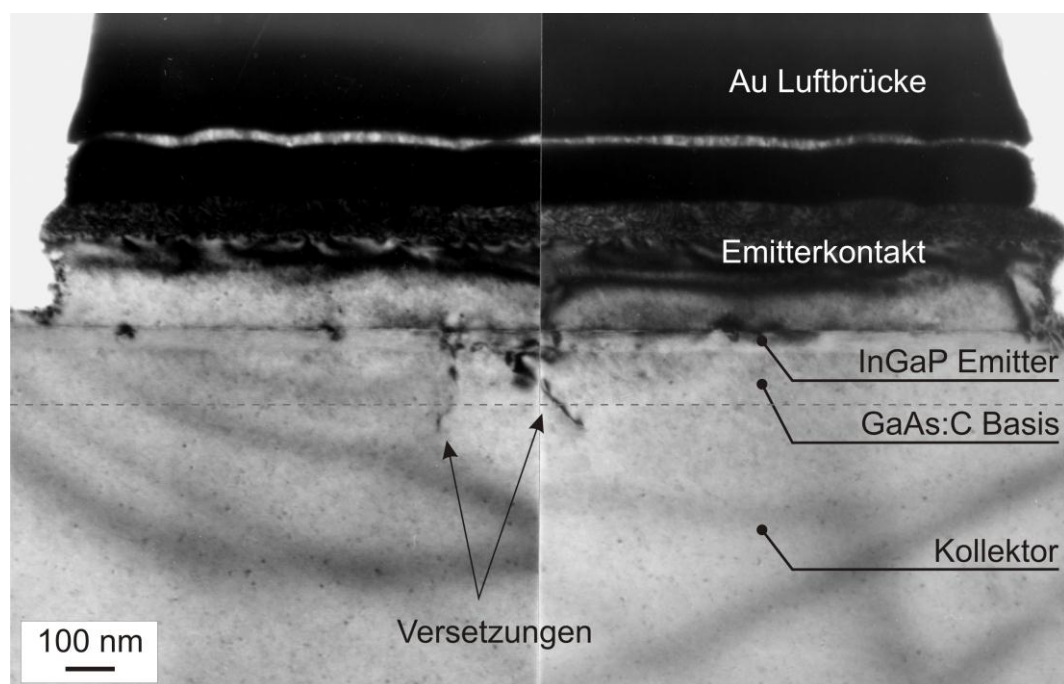


Abbildung 89: TEM-Aufnahme vom Querschnitt eines degradierten HBTs. Zunächst sind keine Kohlenstoffpräzipitate in der Basisschicht in der Nähe der Mesakante sichtbar.

V.4.4. Indium-Diffusion aus dem Emitter

Die Ausdiffusion von Indium aus InGaAs-Quantumwells in das umgebende Material ist von Laserdioden bekannt [Bugg04]. Deshalb wurde insbesondere die InGaP-Emitterschicht untersucht. Für die EDXS-Analyse wurden ein unbelasteter und ein degradierter HBT präpariert. In Abbildung 90 (links) sind die TEM-Abbildung des untersuchten Bereichs und die Pfade der EDXS-Untersuchung dargestellt. Das Ergebnis der Elementanalyse für Indium (Abbildung 90, rechts) zeigt die Verteilung entlang der jeweiligen Pfade an. Die Kurvenform der Indium-Verteilung ist für alle untersuchten Pfade gleich. Dass der Anteil des Indiums nur 11-15 % statt 25 % erreicht, liegt an Ablagerungen an der Oberfläche der Probe während der Präparation, wie bereits in Abschnitt V.2.2.3 beschrieben. Von Wichtigkeit für die Untersuchung ist jedoch die Form der Verteilung, da hier die Diffusion des Indiums aus dem Emitter untersucht wird.

In Abbildung 91 sind die Ergebnisse der EDXS-Untersuchungen des degradierten HBTs dargestellt. Die TEM-Aufnahmen zeigen die EXDS-Pfade und die dort beobachteten Versetzungen. Im Weiteren sind der Indiumanteil für die jeweiligen Pfade (A, C und D) dargestellt. Die Emitterschicht liegt in den jeweiligen Diagrammen aufgrund der etwas veränderten EDXS-Scans etwas unterschiedlich und ist hervorgehoben. Für die EDXS-Untersuchungen wurden drei Pfade, eine im versetzungsfreien (A) und zwei im versetzungsreichen Gebieten (C und D), untersucht und der Indiumanteil bestimmt. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass es im versetzungsfreien (A) Gebiet es zu einer Diffusion von Indium aus dem Emitter gekommen ist. Die Verteilung ist deutlich verbreitet und der Indiumanteil im Maximum ist gesunken. In den versetzungsreichen Gebieten C und D ist eine Ausdiffusion nicht zu erkennen. Die Versetzungen verhindern die Ausdiffusion des Indiums aus dem Emitter.

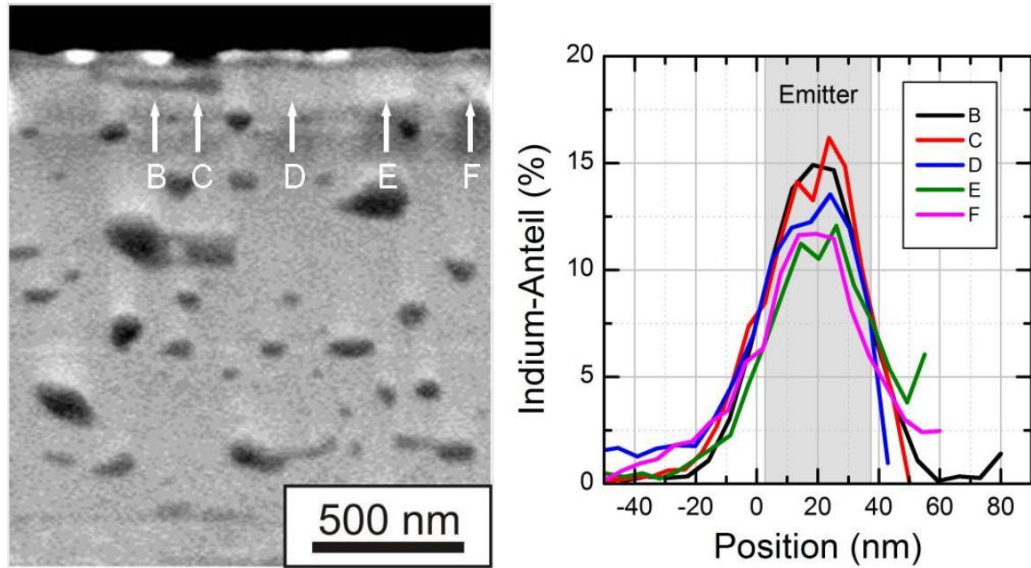


Abbildung 90: EDXS Untersuchung der In-Verteilung um die Emitterschicht eines unbelasteten HBTs

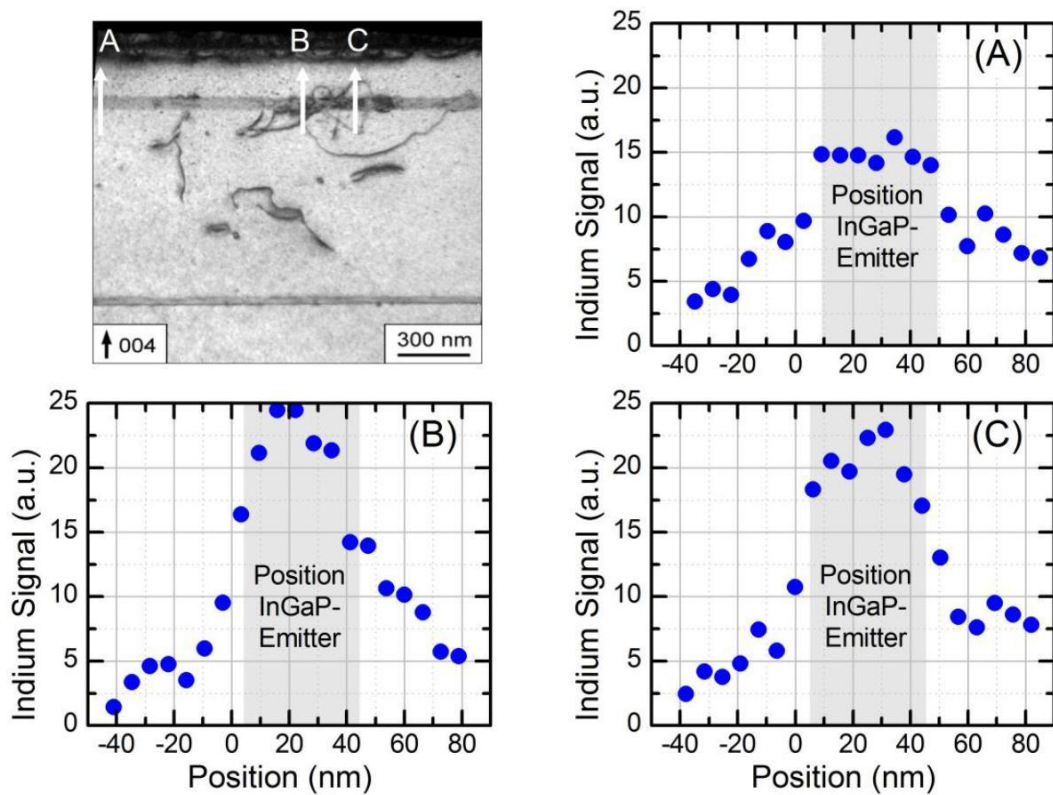


Abbildung 91: EDXS Untersuchung der In-Verteilung um die Emitterschicht eines degradierten HBTs in versetzungsarmen und versetzungsreichen Bereichen.

V.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der analytischen Untersuchungen werden in diesem Abschnitt zusammengefasst:

Die Untersuchung von degradierenden HBTs mithilfe von Elektrolumineszenz (EL) konnte die Entstehung und Ausbreitung von Versetzungen während des Betriebes sichtbar machen. Dabei werden die aktiven Bereiche des Transistors als „leuchtende“ Strukturen sichtbar, während die Versetzungen als dunkle Linien (DLD – Dark Line Defects) in diesem hellen Bereich beobachtet werden. Während der Alterung der HBTs entstandene DLDs und ihre Ausbreitung durch die Finger des Mehrfinger-HBT's konnten mit Elektrolumineszenz beobachtet werden. Die Ausbreitungsrichtung der Versetzungen wurde in der $[110]$ -Richtung identifiziert.

Diese Versetzungen entstehen durch rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR). Bei diesem Degradationsmechanismus führt die durch nichtstrahlende Rekombination freigesetzte Energie zur Entstehung von Punktdefekten, die wiederum als Rekombinationszentren agieren und die Entstehung weiterer Punktdefekte beschleunigen. Das führt zur Ausbildung von Punktdefektclustern und zum Wachstum und zur Ausbreitung von Versetzungen.

Bei den Untersuchungen der degradierten HBTs im TEM wurde keine Diffusion von Kontaktmetallen am Emitter, an der Basis oder am Kollektor ins Halbleitermaterial und auch keine Elektromigration gefunden. Es wurden keine Kohlenstoffpräzipitate in der Basis der HBTs beobachtet, wie sie von anderen Gruppen in der Nähe der Mesakante gefunden wurden. Die Untersuchungen in TEM zeigten, dass degradierte HBTs Versetzungen aufweisen, die vom Emitter ausgehen und in die Basis reichen, in manchen Fällen sogar bis in den Kollektor. Diese Beobachtungen unterstreichen, dass die rekombinationsbeschleunigte Defektreaktion (REDR) der Hauptdegradationsmechanismus in den GaAs-HBTs ist.

Versetzungen werden durch ihren Burgersvektor charakterisiert. Die Bestimmung des Burgersvektors der Versetzungen in den degradierten HBTs zu $\vec{b} = \frac{a}{6}[\bar{1}12]$ zeigte, dass diese Versetzungen nicht zu den typischen Versetzungen in GaAs gehören, wie sie zum Beispiel in GaAs basierten Dioden beobachtet wurden. Die wahrscheinlichsten Burgersvektoren in GaAs sind vom Typ $\frac{a}{2}\langle 110 \rangle$. Die beo-

bachteten Versetzungen sind Mischtypen und ihr Burgersvektor ist entsprechend zusammengesetzt aus verschiedenen Burgersvektoren, wie zum Beispiel $\frac{a}{2}[011]$ und $\frac{a}{2}[10\bar{1}]$.

Eine Elementverteilungsanalyse mit EDXS in TEM zeigte, dass sich die Verteilung des Indiums im InGaP-Emitter in versetzungsfreien Bereichen deutlich unterscheidet von der Indiumverteilung in Bereichen mit Versetzungen. In versetzungsarmen Bereichen diffundiert das Indium während der beschleunigten Alterung des HBT's aus dem Emitter, während in versetzungsreichen Bereichen das Indium von Versetzungen an der Ausdiffusion gehindert wird.

Abschließend wird festgestellt, dass REDR der für die Degradation der HBTs verantwortliche Mechanismus ist. Dies konnte durch analytische Untersuchung von degradierten HBTs festgestellt werden. Die am FBH hergestellten HBTs zeigen keine weiteren Degradationsmechanismen und sind extrem zuverlässig.

Literaturverzeichnis

- [Acho99] Achouche, M., "GaAs Microwave power HBTs for Mobile Communications", GAAS 1999, 1999, pp. 448-451
- [Adle00] M.G. Adlerstein, J.M. Gering, "Current Induced Degradation in GaAs HBTs", IEEE Tran. Elec. Dev., Vol. 47, No. 2, 2000, pp. 434-439
- [Alt07] K.W. Alt, et. al., "Determination of transistor infant failure probability in InGaP/GaAs heterojunction bipolar technology", Microelec. Reliab. 47, 2007, pp. 1175-1179
- [Amer87] E.A. Amerasekera, D.S. Campbell, "Failure Mechanisms in Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1987, ISBN 0-471-91434-7
- [Amon99] J. Amon, J. Härtwig, W. Ludwig, G. Müller, "Analysis of types of residual dislocations in the VGF growth of GaAs with extremely low dislocation density ($EPD \ll 1000 \text{ cm}^{-2}$)", Jour. Of Crystal Growth 198/199 (1999) 367-373
- [Arrh89] S. Arrhenius, "Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren", Zeitschrift für die Physikalische Chemie, Stochiometrie und Verwandtschaftslehre, Vol. 4, No. 2, pp. 226-248, 1889
- [Bahl95] Bahl, S., Reliability Investigation of InGaP/GaAs HBTs, Proc IEDM (1995) 815-822
- [Bert88] Sze (Editor), "VLSI Technologie", McGraw-Hill Inc.,US; Auflage: 2 Sub (April 1988), ISBN 0-07062-735-5
- [Borg97] M. Borgarino, J.G. Tartarin, S. Delage, R. Plana, F. Fantini, J. Graffeuil, "Correlation between the burn-in effect and the extrinsic base surface quality in C-doped GaInP/GaAs HBTs", Proc. EDMO 1997, pp. 43-48
- [Borg99] M. Borgarino, R. Plana, S. Delage, F. Fantini, J. Graffeuil, "On the short and long term degradation of GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors", Microelec. Reliab. 39 (1999) 1823-1832
- [Bovo00] N. Bovolon, et al., "Analysis of the Short-Term DC-Current Gain Variation During High Current Density-Low Temperature Stress of AlGaAs/GaAs HBTs", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 47, No. 2, February 2000
- [Bovo98] N. Bovolon et al., "A simple method for the thermal resistance measurements of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 45, 1846-1848, Aug 1998
- [Brun02] F. Brunner, "Galliumarsenid-basierte Heterobipolar-Transistoren", Cuvillier Verlag Göttingen, 2002, ISBN 3-89873-553-2

- [Brun03] F. Brunner, A. Braun, P. Kurpas, J. Schneider, J. Würfl, M. Weyers, "Investigation of short-term current gain stability of GaInP/GaAs-HBTs grown by MOVPE", *Microelec. Reliab.* 43 (2003) 839-844
- [Bugg04] F. Bugge. Et al., "Interdiffusion in highly strained InGaAs-QWs for high power laser diode applications", *Journ Crys Growth* 272 (2004) pp. 531-537
- [Chi97] J.Y. Chi, K. Lu, "Mechanism for the Initial Current Gain Increase in Carbon-Doped Heterostructure Bipolar Transistors", *Proc. GaAs Reliab. Workshop* 1997, pp. 8-12
- [Cunn89] B.T. Cunningham, L.J. Guido, J.E. Baker, J.S. Major, N. Holonyak, G.E. Stillman *Applied Physics Letters* 55 (1989) 687
- [Dang90] J.Dangla, C.Dubon-Chevallier, M.Filoché, R.Azoulay, Electrical Characterisation of the p-type dopant diffusion of highly doped AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors grown by MOCVD, 1990, *Electronics Letters*, 26, 1061-1063.
- [Dangla90] J.Dangla, C.Dubon-Chevallier, M.Filoché, R.Azoulay, Electrical Characterisation of the p-type dopant diffusion of highly doped AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors grown by MOCVD, 1990, *Electronics Letters*, 26, 1061-1063.
- [Davito93] D. B. Davito et al, „Manufacturing improvements of GaAs heterojunction bipolar transistors using a Ga_{0.5}In_{0.5}P emitter", U.S. conf. GaAs Manufacturing Technology, 1993, pp. 25-
- [Daws92] D.E. Dawson, A.K. Gupta, M.L. Salib, "CW Measurement of HBT Thermal Resistance", *IEEE Trans. Elec. Dev.*, Vol. 39, No. 10, 1992, pp. 2235-2239
- [Feng01] K. T. Feng, L. Rushing, P. Canfield, and L. Flores, "Determination of Reliability on MOCVD Grown InGaP-GaAs HBTs under both Thermal and Current Acceleration Stresses" *GaAs Reliability Workshop Proc.*, 2001, pp. 159–180.
- [Fush91] Fushimi, "Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs", Artech House, Boston, 1991
- [Fush94] H. Fushimi, K. Wada, "The presence of isolated hydrogen donors in heavily carbon-doped GaAs", *Journal of Crystal Growth*, Volume 145, Issues 1-4, 2 December 1994, Pages 420-426
- [Fush95] H. Fushimi and K. Wada, "Hydrogen induced degradation in heavily carbon-doped GaAs diodes," *Mater. Sci. Forum.*, Vols. 196–201, pp. 957–962, 1995.
- [Galw95] A.K. Galwey and M.E.Brown, "A theoretical justification for the application of the arrhenius equation to kinetics of solid state reaction (mainly ionic crystals)", *Proc. Reza. Soc. Lond. A*, vol. 450, pp. 501-512, 1995
- [Gupt01] A. Gupta, B. Bayraktaroglu, "InGaP Makes HBT Reliability a Non-Issue", *Proc. GaAs MANTECH*, 2001

- [Hafi90] M.E. Hafizi, C.R. Crowell, M.E. Grupen, "The DC Characteristics of GaAs/AlGaAs Heterojunction Bipolar Transistors with Application to Device Modeling", IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 37, No. 10, 1990, pp. 2121-2129
- [Hafi92] M.Hafizi, R.A.Metzger, W.E.Stanchina, D.B.Rensch, J.F.Jensen, W.W.Hooper, The Effects of Base Dopant Diffusion on DC and RF Characteristics of InGaAs/InAlAs Heterojunction Bipolar Transistors, 1992, IEEE Electron Dev. Lett., 13, 140-142.
- [Harr98] Harris, M., Full 2-D Electroluminescent Analysis of GaAs-AlGaAs HBTs, Proc GaAs Reliability Workshop, 1998
- [Hend02] T. Henderson, "Modeling gallium arsenide heterojunction bipolar transistor ledge variations for insight into device reliability", Microelec. Reliab. 42 (2002) 1011-1020
- [Hend94] T. Henderson et al, "Characterization of bias-stressed carbon-doped GaAs/AlGaAs power heterojunction bipolar transistor", IEDM Tech. Digest 1994, pp. 187 – 190
- [Hend96] T. Henderson, "The GaAs heterojunction bipolar transistor- an electron device with optical device reliability", Microelectronics Reliability, vol 36, No 11/12, pp. 1879-1886, 1996
- [Hend96] Henderson, T., "Electroluminescence: An Essential Technique for Characterization of HBTs Before and After Bias Stress", Proc. GaAs Rel. Workshop 1996, pp. 28-33
- [Hend97] T. Henderson, "Effects of Electrostatic Discharge on GaAs-based HBTs", Techn. Dig. GaAs-IC Symp. 1997, pp. 147-150
- [Hend99] T. Henderson, "Physics of degradation in GaAs-based heterojunction bipolar transistors", Microelectronics Reliability 39 (1999) 1033-1042
- [Hirt82] J. P. Hirth, J. Lothe, „Theory of Dislocations“, 2nd ed. Wiley, New York (1982)
- [Hobb00] Hobbs, G., Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS, John Wiley & Sons, 2000.
- [Hu92] J.M. Hu, D. Barker, A. Dasgupta, and A. Arora, "Role of failure-mechanism identification in accelerated testing", Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 181.187, Jan 1992
- [Hull84] D. Hull, D. J. Bacon, „Introduction to dislocations“, Pergamon Press, Oxford (1984)
- [Ieee90] IEEE, Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 1990.
- [Joyc75] W.B. Joyce, "Thermal resistance of heat sinks with temperature-dependent conductivity," Solid State Electron., vol. 18, pp. 321–322, 1975.

- [Kime78] Kimerling, L.C. , Solid-State Electronics, 21 (11), p.1391-1401, Nov 1978
- [Kozu93] D. M. Kozuch, et al, "Passivation of carbon-doped GaAs layers by hydrogen introduced by annealing and growth ambients," J. Appl. Phys., vol. 73, pp. 3716–3724, 1993
- [Kroe57] H. Kroemer, "Theory of A Wide-Gap Emitter for Transistors", Proc. IRE, vol. 45, no. 11, pp. 1535-1537, November 1957
- [Kroe82] H. Kroemer, "Heterostructure Bipolar Transistors and Integrated Circuits," Proc. IEEE, vol. 70, pp. 13-25, 1982.
- [Kurp02] P. Kurpas, A. Maaßdorf, W. Doser, P. Heymann, B. Janke, F. Schnieder, H. Blanck, P. Auxemery, D. Pons, W. Heinrich, J. Würfl, "10 W GaInP-GaAs Power HBTs for Base Station Applications", Dig. IEDM 2002, pp. 681-684
- [Kurp03] P. Kurpas, A. Maaßdorf, W. Doser, W. Köhler, P. Heymann, B. Janke, F. Schnieder, H. Blanck, Ph. Auxemery, D. Pons, W. Heinrich, J. Würfl, Proc. GaAs Mantech Conference, pp. 99-102, 2003.
- [Kurp04] P. Kurpas, A. Maaßdorf, M. Neuner, W. Doser*, P. Heymann, B. Janke, F. Schnieder, T. Bergunde, T. Graßhoff, H. Blanck*, Ph. Auxemery**, W. Heinrich, J. Würfl Flip-Chip Mounted 26 V GaInP/GaAs Power HBTs 2004 IEDM Technical Digest, pp. 561-564, 2004.
- [Lee08] C.P. Lee et al. "A phenomenological model for the reliability of GaAs based heterojunction bipolar transistors", Jour. Appl. Phy. 103, 094512 (2008)
- [Lin00] B. Lin, "InGaP HBTs Offer Enhanced Reliability", Applied Microwave & Wireless, Dec 2000, pp. 115-116
- [Liu92] W. Liu, S. Fan, "Near-ideal I-V characteristics of GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Elec. Dev. Lett., Vol. 13, No. 10, 1992, pp. 510-512
- [Liu93] W. Liu et al, "Temperature dependence of current gains in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors", IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 40, No. 7, 1993, pp. 1351-
- [Liu95] W. Liu, A. Yuksel, "Measurement of junction temperature of an AlGaAs-GaAs heterojunction bipolar transistor operating at large power densities", IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 42, No. 2, 1995, pp. 358-360
- [Liu98] W. Liu, "Handbook of III-V Heterojunction Bipolar Transistors", John Wiley & Sons, 1998, ISBN 0-471-24904-1
- [Low07] T.S. Low, et al., "The Role of Substrate Dislocations in Causing Infant Failures in High Complexity InGaP/GaAs HBT ICs", CS ManTech, 2007, pp. 43-46
- [Low98] T. S. Low et al, "Migration from an AlGaAs to an InGaP Emitter HBT IC Process for Improved Reliability", Proc. GaAs IC Symp. 1998, pp. 153-156

- [Lu96] K. Lu, Ch.M. Snowden, "Analysis of thermal instability in multi-finger power AlGaAs/GaAs HBTs," IEEE Trans. Electron Dev., vol. 43, pp. 1799 – 1805, Nov. 1996.
- [Magi92] Magistrali, F., in Christou, A., "Reliability of Gallium Arsenide MMICs", John Wiley & Sons, New York (1992), pp. 101-189
- [Maye07] J. Mayer, et al, "TEM Sample Preparation and FIB-Induced Damage", Materials Research Society Bulletin, Vol 32, May 2007, pp. 400-407
- [Maas07] A. Maaßdorf, „Entwicklung von GaAs-basierten Heterostruktur-Bipolartransistoren (HBTs) für Mikrowellen-Leistungszellen“, *Göttingen: Cuvillier Verlag, 2009, ISBN 978-3-86727-743-3*
- [McIn96] P.M. McIntosh, "Determination of HBT thermal resistance using pulsed I-V measurements", Proc. EDMO '96, 1996, pp. 120-125
- [MIL217] Department of Defense, "MIL-HDBK-217F, Rev. 2, Reliability prediction of Electronic Equipment", Military Handbooks, 28-FEB-1995
- [Mino86] M. N. Minot, "Thermal Characterization of Microwave Power HFETs Using Nematic Liquid Crystals", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1986, pp. 495-498.
- [Naka92] O. Nakajima, H.Ito, T.Nittono, K.Nagata, 1992, Jpn. Journ. Appl. Phys., 31, 2343-2348
- [Neba00] E. Nebauer, et al., "Au/Pt/Ti/Pt base contacts to n-InGaP/p+-GaAs for self-passivating HBT-ledge structures", Semicond. Sci. Technol., vol. 15, pp. 818-822, 2000.
- [Nobe00] <http://nobelprize.org/physics/laureates/2000/index.html>
- [Nobe56] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1956/index.html>
- [Ohku30] Y. Ohkubo, A. Takagi, Y. Amano, T. Koji, K. Kashiwagi, Y. Matsuoka, "High-reliability InGaP/GaAs HBTs with 153 GHz f_t and 170 GHz f_{max} ", Elec. Lett., Vol. 39, No. 25, 2003,
- [Olav02] M. Olavsbraten, "A Simple Practical Technique for Estimating the Junction Temperature and the Thermal Resistance of a GaAs HBT", Dig. ;Microw. Symp. 2002, pp. 1005-1008
- [Pan98] N.Pan, J.Elliott, M.Knowles, D.P.Vu, K.Kishimoto, J.K.Twynam, H.Sato, M.T.Fresina, G.E.Stillman, High Reliability InGaP/GaAs HBT, 1998, IEEE Electron Device Letters, 19, 115-117.
- [Peck21] D. S. Peck, "New Concerns About Integrated Circuit Reliability", Reliability Physics, 16th Annual Proceedings, 1978, pp. 1-6
- [Peck78] D.S. Peck, "New Concerns About Integrated Circuit Reliability", Reliability Physics, 16th Annual Proceedings, 1978, pp. 1-6
- [Rahb93] R. Rahbi, B. Pajot, J. Chevallier, A. Marbeuf, R.C. Logan, M. Gavant, J. Appl. Phys. 73 (1993) 1723

- [Ren95] Ren, F., The role of hydrogen in current-induced degradation of carbon-doped GaAs/AlGaAs HBTs, *Solid-State Elec* 38 (1995) 1137
- [Rich95] E. Richter, P. Kurpas, D.Gutsche, and M. Weyers, "Carbon Doped GaAs Grown in Low Pressure-Metalorganic Vapor Phase Epitaxy Using Carbon Tetrabromide", *Journ. of Elect. Mat.*, Vol. 24, No. 11, 1995, pp. 1719-1722
- [Rudo04] Rudolph, M. and Schnieder, F. and Heinrich, W., "Investigation of Thermal Crunching Effects in Fishbone-Type Layout Power GaAs-HBTs", *Gallium Arsenide Applications Symposium. GAAS 2004*, 11—12 Ottobre, Amsterdam.
- [Rudo99] P. Rudolph, M. Jurisch, "Bulk growth of GaAs - An Overview", *Journal of Crystal Growth* 198/199 (1999) 325-335
- [Scot01] J. Scott, "Reconciliation of Methods for Bipolar Transistor Thermal Resistance Extraction", *IEEE ISCAS 2001*, Vol. 3, pp. 465-468
- [Shir95] J.Shirakashi, T.Azuma, F.Fukuchi, M.Konagai, K.Takahashi, In-GaP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors with an Ultra-High Carbon-Doped Base, 1995, *Jpn. Journ. Appl. Phys.*, 34, 1204-1207.
- [Sugi02] T. Sugiyama, et al., "Direct observation of gain collapse phenomena in multi-finger HBTs using digital cameras", *Dig. CS MAN-TECH 2002*
- [Taka94] T. Takahashi, "High-Reliability InGaP/GaAs HBTs fabricated by self-aligned process", *IEDM Tech Digest*, pp 191, 1994
- [Taka94] T. Takahashi, "High-Reliability InGaP/GaAs HBTs fabricated by self-aligned process", *IEDM Tech Digest*, pp 191, 1994
- [Take92] M. Takeguchi, et al., "Study of defects and Strains on Cleaved GaAs (110) Surface by Reflection Electron Microscopy", *J. Elec Microsc* 41 (1992) pp. 174-178
- [Thei82] W.M. Theis, K.K. Bajaj, C.W. Litton, W.G. Spitzer, *Applied Physics Letters* 41 (1982) 70
- [Tien06] Tien, T.Q., et al, "Thermal properties and degradation behavior of red-emitting high-power diode lasers", *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 181112
- [Ueda88] O. Ueda, "Degradation of III-V Opto-electronic Devices", *Appl. Mössb. Spec.*, Vol. 135, No. 1, 1988, pp. 11C-22C
- [Ueda96] O. Ueda, "Reliability and degradation of III-V optical devices", *Artech House*, 1996, ISBN 0-89006-652-3
- [Ueda97] O. Ueda, et. al., *Solid State Electronics*, Vol. 41, No. 10, 1997, pp. 1605
- [Ueda99] O. Ueda, "Reliability issues in III-V compound semiconductor devices: optical devices and GaAs-based HBTs", *Microelectronics Reliability* 39 (1999) pp. 1839-1855

- [Uema91] Uematsu, Recombination-enhanced impurity diffusion in Be-doped GaAs, Appl. Phys. Lett. 58, (18) 6 May 1991, 2015-2017
- [USPa48] U.S. Patent 2 569 347, W. Shockley, filed 26.6.1948, ausgestellt 25.9.1951, abgelaufen 24.9.1968
- [vdWe04] Van der Wel, P. J., State of the art thermal analysis of GaAs/InGaP HBT, IEEE CSICS, 2004, 79-82
- [Wagn97] J. Wagner et al, "Di-Carbon Defects in Annealed Highly Carbon Doped GaAs", Phys. Rev. Lett. 78, 74 - 77 (1997)
- [Wei96] C.-J. Wei, et al., "Large-Signal Modeling of Self-Heating, Collector Transit-Time, and RF-Breakdown Effects in Power HBTs", IEEE Trans Microw. Theo. & Tech., Vol. 44, No. 12, 1996 pp. 2641-2647
- [Yama92] F.M.Yamada, A.K.Oki, D.C.Streit, Y.Saito, D.K.Umemoto, L.T.Tran, S.Bui, J.R.Velebir, W.McIver, Reliability Analysis of Microwave GaAs/AlGaAs HBTs with Beryllium and carbon Doped Base, 1992, Proc. MTT Symposium, 739-742
- [Yang00] Q. Yang, et al., "Optimization of emitter cap growth conditions for InGaP/GaAs HBTs with high current gain by LP-MOCVD", Journal of Electronic Materials, vol. 29, issue 1, pp. 75-79, 2000
- [Yeat02] B. Yeats, M. Bonse, P. Chandler, M. Culver, D. D'Avanzo, G. Essilfie, C. Hutchinson, D. Kuhn, T. Low, T. Shirley, "Reliability of InGaP Emitter HBTs at High Collector Voltage", Dig. IEEE GaAs-IC Symp. 2002, pp. 73-76
- [Yeat08] B. Yeats, et al., "GaAs HBT Reliability", IEEE CSICS, 2008
- [Yeat08] B. Yeats, T.S. Low, K. Alt, M.E. Adamski, M. Bonse, D.C. D'Avanzo, M. Dvorak, C.P. Hutchinson, M. Iwamoto, F.G. Kellert, D.K. Kuhn, R.L. Shimon, T.E. Shirley, "GaAs HBT Reliability", dig. IEEE CSICS, 2008
- [Zinke93] Zinke, Brungswig, „Lehrbuch der Hochfrequenztechnik“, Band 2, Springer Verlag Heidelberg (1993)

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Günther Tränkle, der es mir am Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) ermöglichte, diese Arbeit zu erstellen, mir in regelmäßigen Abständen inhaltlich und organisatorisch zur Seite stand und meine Promotion betreute.

Weiterhin möchte ich mich bei Dr. Joachim Würfl bedanken, der mich als Abteilungsleiter beim Aufbau und der Erweiterung des Lebensdauerlabors unterstützte und mich fachlich beratend zur Seite stand.

Bei Frau Dr. Ute Zeimer möchte ich mich für ihre Betreuung, ihre Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der analytischen Untersuchungen und ihre intensive Hilfe und Geduld bei der Anfertigung dieser Arbeit bedanken.

Herrn Dipl.-Phys. Andreas Braun, Herrn Dr. Michael Mai und Herrn Dr. Frank Brunner danke ich für ihre Hilfe bei der Einarbeitung in das Gebiet der Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Degradationsmechanismen, sowie der Messtechnik und der Unterstützung bei den Messungen. Ich danke Herrn Dr. Paul Kurpas und Herrn Dr. Andre Maaßdorf für die diversen ausführlichen fachlichen Diskussionen und ihrer Hilfe, die Funktionsweise und die Technologie zur Herstellung der HBTs besser zu verstehen.

Ich bedanke mich auch bei der Aufbautechnik für die Unterstützung bei der Anfertigung der Proben für die Untersuchung der aufgebauten HBTs. Herrn Dr. Werner Österle und seiner Analytikgruppe von der „Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung“ danke ich für die Anfertigung und Untersuchung der TEM Proben. Ich bedanke mich auch bei Herrn Dr. Holm Kirmse von der Humboldt-Universität zu Berlin für die analytischen Untersuchungen an den TEM Proben und der Hilfe bei der Auswertung der Daten.

Besonderer Dank gilt meiner Frau und meiner Familie für ihre Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit.