

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 nm), insbesondere für Hochfrequenzanwendungen (1 – 100 GHz), zum Beispiel für das Abstandsradar in Fahrzeugen bei 77 GHz und auch für Anwendungen, die hohe Signalleistungen (> 50 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 (~ 1 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*, „Enery Dispersive X-Ray Spectroscopy“

