

Zusammenfassung

Diese Dissertation beschreibt die Entwicklung eines Herstellungsprozesses für Supraleiter-Isolator-Supraleiter (SIS) Tunnelemente für Band 2 des Heterodyn-instrumentes (HIFI) für das Herschel Satellitenobservatorium (HSO) von 636 – 802 GHz. SIS Elemente werden bevorzugt in der Radioastronomie als Frequenzmischer in Heterodynempfängern eingesetzt und bieten neben einer hohen Empfindlichkeit im Millimeter und Submillimeterbereich eine größtmögliche Frequenzauflösung. HIFI ist eines von drei astronomischen Instrumenten für das Herschel Satellitenobservatorium (HSO). Von diesen Entwicklungen profitieren weitere Empfänger mit Beteiligung des Kölner Observatoriums für Submillimeter Astronomie (KOSMA), vor allem im Frequenzbereich um 800 GHz, wie zum Beispiel der SMART Multi-Pixel-Zweifrequenz-Empfängers (475 GHz und 800 GHz), der am KOSMA Observatorium auf dem Gornergrat in der Schweiz seit 2001 in Betrieb ist. Seit einigen Jahren werden solche Mischer in zwei Empfängern bei AST/RO (Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory) in der Amundsen Scott South Pole Station eingesetzt.

Ein SIS Mischelement besteht aus einer Tunneldiode und einer integrierten Hochfrequenz-Impedanz-Anpassstruktur in Mikrostreifenleitertechnik. Solange beide Elektroden der Anpassstruktur supraleitend sind, ist die Hochfrequenztransmission durch die Leitung fast verlustfrei. Allerdings liegt die Energielücke des Supraleiters Nb, der bisher für beide Elektroden benutzt wurde, bei etwa 700 GHz und teilt damit das HIFI Frequenzband 2. Oberhalb dieser Lückenfrequenz ist eine integrierte Anpassstruktur, sofern sie aus zwei Nb Elektroden besteht, stark verlustbehaftet. Allerdings müssen die Mischer für HIFI aufgrund der strengen Anforderungen an das Instrument im gesamten Frequenzbereich äußerst verlustarm arbeiten. Daher sollte zumindest eine der beiden Nb Elektroden durch einen Supraleiter mit höherer Energielücke ersetzt werden. Das gewählte Material ist NbTiN, dessen Energielücke Hochfrequenzverluste erst oberhalb von 1 THz erwarten lässt. Außerdem lassen sich bestehende SIS Herstellungsprozesse relativ einfach in die NbTiN Dünnschichttechnologie integrieren. Für das Design der Tunnelemente für HIFI Band 2 wurden daher die bewährten Nb-Al/Al₂O₃-Nb Tunnelnennungen in Anpassstrukturen eingebettet, die aus NbTiN-SiO₂-Nb bzw. NbTiN-SiO₂-Al bestehen.

Der Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die Hochfrequenzeigenschaften eines Mischelementes wird anhand von Simulationsrechnungen verdeutlicht. Am kritischsten erweisen sich dabei die Lithographietoleranzen bei der Definition der Tunnelnennflächen sowie Abweichungen in den Eigenschaften der NbTiN Dünnschichten. Beispielsweise haben NbTiN Filme, die im KOSMA Mikrostrukturierungslabor hergestellt wurden, eine Sprungtemperatur von $T_c = 14.5 K$ und einen spezifischen Widerstand von $\rho = 100 \mu\Omega cm$. Variationen dieser Parameter dürfen nicht mehr als $\Delta T_c = \pm 0.5 K$ und $\Delta \rho = \pm 10 \mu\Omega cm$ betragen, um eine gute Hochfrequenzkopplung durch die resonanten Anpassstrukturen im gesamten HIFI Band 2 zu ermöglichen. Die NbTiN Filme werden durch reaktives DC-Magnetron-Sputtern auf dem Substrat aufgebracht. Dieser Prozess musste derart entwickelt und opti-

miert werden, dass dünne Filme dieser hohen Güte zuverlässig und innerhalb der Spezifikationen hergestellt werden konnten.

Zu diesem Zweck wurden die Herstellungsparameter im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf das Filmwachstum und die Filmqualität analysiert, und es stellte sich heraus, dass die Substrattemperatur während des Sputterns als einer der kritischsten Parameter anzusehen ist. Seit 2002 ermöglicht eine neue Sputteranlage auch Filme auf bis zu 800°C heißen Substraten herzustellen. Mit dem alten Sputtersystem konnte die Substrattemperatur nur indirekt über den Sputterdruck oder die Magnetkonfiguration der Sputterkathoden beeinflusst werden. Die NbTiN-Prozessoptimierung in beiden Sputtersystemen führte zur zuverlässigen Deposition von Dünnschichten mit $T_c = 14.5 K$ und $\rho = 100 \mu\Omega cm$ auf Substraten bei Umgebungstemperatur und zu Filmen mit $T_c = 15 K$ und $\rho = 80 \mu\Omega cm$ auf geheizten Substraten.

Als weiteres Beispiel für die Prozesstoleranzen sei hier die Flächengenauigkeit und Reproduzierbarkeit der SIS Elemente angeführt. Die Analyse zeigt, dass eine Flächenreproduzierbarkeit besser als $\pm 10\%$ der nominellen Fläche notwendig ist. Im Falle einer typischen Fläche von $0.8 \mu m^2$ ist das gleichbedeutend mit einer linearen Toleranz von höchstens $\pm 50 nm$. Eine solch hohe Präzision ist nur mit Elektronenstrahlolithographie möglich. Letztendlich wird die Fläche aber nicht nur von der lithographischen Definition bestimmt, sondern vor allem von den Eigenschaften des Reaktivionenätzverfahrens zur Strukturierung des Tunnelelementes. Ätzrezepte, die zum isotropen Materialabtrag in vertikaler und lateraler Richtung tendieren, zeigen dabei eine deutlich schlechtere Flächenreproduzierbarkeit als Ätzrezepte mit anisotroper Wirkung. Mit den Gasmischungen $NF_3 + CCl_2F_2$ oder $SF_6 + CHF_3$ sind anisotrope Ätzungen mit einem Verhältnis von vertikaler zu lateraler Ätzrate von 4:1 möglich, und eine Reproduzierbarkeit von $\pm 10\%$ konnte für Flächen $A_j \geq 1 \mu m^2$ erreicht werden.

Zunächst wurde die Integration der neuentwickelten NbTiN Dünnschichten in die SIS Fabrikation mit Hilfe eines vereinfachten Herstellungsprozesses demonstriert, bei dem die Tunnelelemente mit UV Photolithographie (UVL) definiert werden. Die Photoresistschicht, welche die Fläche der Tunnelelemente definiert, wird dabei gleichzeitig als Ätzmaske verwendet (self-aligned Nb etch process, SNEP). Später wurde der Herstellungsprozess auf die sehr viel präzisere Elektronenstrahlolithographie (EBL) umgestellt und weiterentwickelt. In diesem Fall wurde aus prozesstechnischen Gründen ausserdem ein chemisch-mechanisches Polieren (CMP) der Dielektrikumsschicht notwendig. Mit diesem verbesserten Fabrikationskonzept ließ sich auch die Flächenreproduzierbarkeit der Tunnelelemente deutlich erhöhen.

Es stellte sich heraus, dass alle SIS-Tunnelelemente, die für HIFI Band 2 hergestellt wurden und deren untere Anpassstrukturelektrode aus NbTiN bestand, einen signifikant höheren Leckstrom aufweisen, als SIS Elemente mit Nb als Material für beide Anpassstrukturelektroden. Der um einen Faktor 2 höhere Leckstrom führt dann zu einem erhöhten Schrotrauschen durch die Barriere und damit zu einer Verschlechterung der Rauschtemperatur des Bauteils. Es ist anzunehmen, dass sich die höhere Rauigkeit der NbTiN Oberfläche im Vergleich zu Nb bis

zur Barriere fortsetzt und dort zur Bildung von Barrierendefekten führt. Mit Hilfe von anodischer Oxidations Spektroskopie (AOS) konnten zumindest breite Diffusionsschichten an der Barriere nachgewiesen werden, die auf eine erhöhte Rauigkeit hindeuten.

Die hohe Empfindlichkeit der SIS Elemente wurde mit Fourier Transform Spektrometer (FTS) und Heterodynmessungen bestätigt. Die besten Mischelemente wurden ausgewählt und in die flight model (FM) Mischer eingebaut. Die gemessene Empfängerrauschtemperatur dieser Mischer liegt im gesamten Frequenzband von $636 - 802 \text{ GHz}$ unter 200 K . Bei 708 GHz wurde eine minimale Rauschtemperatur von 81 K gemessen. Integriert über das gesamte Frequenzband erhält man für die beiden FM Mischer Rauschtemperaturen von 126 K bzw. 129 K und sie liegen damit im Rahmen der Vorgaben für HIFI (130 K). Bei Frequenzen oberhalb von 700 GHz zeigen sich die Vorteile einer NbTiN Elektrode in der Mikrostreifenleitung und im Vergleich zu früher bei KOSMA hergestellten Mischern mit Nb oder Al-Anpassstrukturelektroden die größten Verbesserungen. Damit gehören die Mischer für das HIFI Band 2 von $636 - 802 \text{ GHz}$ zu den weltweit empfindlichsten und breitbandigsten Mischern in diesem Frequenzbereich.