

Stefan Selig

**Superconductor Insulator  
Superconductor Mixer Devices  
with Gold Energy Relaxation Layers**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# Superconductor Insulator Superconductor Mixer Devices with Gold Energy Relaxation Layers





# Superconductor Insulator Superconductor Mixer Devices with Gold Energy Relaxation Layers

## Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von

**Stefan Selig**

aus Daun

Köln, 2016



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: Köln, Univ., Diss., 2016

Berichterstatter:

Prof. Dr. Jürgen Stutzki

Prof. Dr. Markus Grüninger

Tag der mündlichen Prüfung:

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft

ISBN 978-3-7369-9460-7

eISBN 978-3-7369-8460-8



## Abstract

This thesis focuses on the development of a novel superconductor insulator superconductor (SIS) mixer technology for 800 GHz that could in the future be used up to 1.1 THz. This is an important part of the THz spectrum that is still accessible for astronomy from ground based observatories. Compared to the existing mixers in this frequency regime the sensitivity shall be improved by the use of fully superconducting radio-frequency (RF) matching circuits. The main innovation in this work is the inclusion of an energy relaxation layer (ERL) made of gold (*Au*) that enables the use of these fully superconducting RF circuits in combination with the mature niobium (*Nb*) SIS junction technology. The ERL prevents heating of the SIS junction due to Andreev reflection at the interface between the junction electrode and the matching circuit transmission line which was observed in earlier developments. This work includes the development of a fabrication process as well as extensive DC and RF measurements and their interpretation.

Up to now SIS mixers with partly normal conducting RF matching circuits that match the junction impedance to the waveguide antenna, were used between 800 GHz and 1.1 THz. For example, the SMART receiver employs *NbTiN* – *Nb* – *Al*/*Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub>* – *Nb* – *Al* devices where *NbTiN* and *Al* are the bottom and top layers of the RF matching circuit. *Nb* – *Al*/*Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub>* – *Nb* junctions are used because of the superior barrier quality compared to other material combinations. In this work this junction type is applied, too. For the embedding RF matching circuit *Nb* is not used, because above its gap frequency of 700 GHz Cooper pairs break in the *Nb* and this causes losses. To realize a low noise mixer using this type of junction, a different material, ideally a superconductor with a higher energy gap, has to be used for the RF matching circuit.

In this work the use of a fully superconducting RF circuit with top and bottom layers made of *NbTiN* is investigated. In an earlier work an elevated electron temperature inside the *Nb* junction was observed when such device was DC biased, deteriorating its mixer performance. In this work, an additional *Au* layer is inserted between the *Nb* junction and the top layer of the *NbTiN* matching circuit. This *Au* layer provides energy relaxation for injected quasiparticles from the *Nb* junction.

An important task of this work was the development of a fabrication process for SIS devices that include the additional *Au* layer. The developed process uses elements from already established fabrication schemes and extends them by adding the ERL. For the definition of the extended *Au* layer an electron beam lithography

(EBL) process was developed using a bilayer resist process using a combination of PMMA and a PMMA/MMA mixture. Additionally, the definition of the top layer of the matching circuit by EBL was implemented as standard procedure for the first time at KOSMA, using UV5 as EBL resist.

In a first step, DC-IV measurements confirm that the additional *Au* layer in fact does reduce or even prevent the elevation of the electron temperature inside the *Nb* junction of a *NbTiN – Nb – Al/Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub> – Nb – Au – NbTiN* device. An analysis of the DC-IV characteristic yields the current dependent values for the electron temperature and how it is influenced by addition of the *Au* layer. The influence on the junction's electron temperature for two different configurations of the *Au* layer was studied. First, for an *Au* layer confined to the junction area, the influence of the *Au* layer thickness on the electron temperature was investigated. Secondly, for an *Au* layer with an area much larger than the junction area, the influence of the lateral dimensions of the *Au* layer on the electron temperature was studied. It was found that the elevation of the electron temperature resulting from a DC current can be eliminated if the volume of the *Au* layer is sufficiently large. By choosing the volume, it turns out that its geometry (thickness and lateral shape) have a crucial influence on the electron temperature and that below a certain thickness, the ERL is not efficient anymore.

A model to calculate the *Au* layer dimensions required to prevent elevation of the electron temperature was developed based on a heat transport equation, describing heat flow from the junction to the surrounding materials. As input for these calculations DC-IV measurements were used. In a second step the findings from the DC characterization measurements were applied to design high frequency devices working at 800 GHz. Test mixer devices were fabricated and RF measurements at 804 GHz were conducted. Pumped DC-IV characteristics (the device is DC biased and irradiated with a local oscillator) were recorded of devices with and without ERL and a reduction of the high frequency power heating was found for the device with ERL compared to the one without. In addition, noise temperature measurements were performed in a test heterodyne setup. The device performance as a frequency mixer was characterized and then the data was compared to earlier measurements of devices for the SMART receiver. The sensitivity gain of the SIS mixer studied in this thesis could not be shown yet. For that the test setup and device current density need to be fully optimized. Nevertheless, it could be shown experimentally that high frequency power heating is reduced by the added *Au* layer, by comparing with IV characteristics of devices with normal conducting top electrode of the RF matching circuit. This promises improved mixer performance in an optimized heterodyne setup.

## Zusammenfassung

Diese Dissertation konzentriert sich auf die Entwicklung einer neuen Supraleiter-Isolator-Supraleiter (SIS) Mischer-Technologie für 800 GHz, die in Zukunft auch für 1,1 THz genutzt werden kann. Dieser Frequenzbereich ist ein wichtiger Teil des THz Spektrums, der noch von erdgebundenen Observatorien beobachtbar ist. Verglichen mit existierenden Mixern in diesem Frequenzbereich soll die Empfindlichkeit verbessert werden durch die Verwendung von vollständig supraleitenden Hochfrequenz(RF)-Anpassschaltungen. Die größte Neuerung in dieser Arbeit ist das Hinzufügen einer energieableitenden Schicht (ERL) aus Gold ( $Au$ ), die vollständig supraleitende RF Schaltungen in Verbindung mit der ausgereiften Niob ( $Nb$ ) SIS Tunnelkontakt-Technologie ermöglicht. Die ERL verhindert das Aufheizen des SIS Tunnelkontakts durch Andreev Reflektion an der Schnittfläche zwischen Tunnelkontaktelektrode und der Anpassschaltung, wie es bei früheren Entwicklungen beobachtet wurde. Diese Arbeit schließt die Entwicklung eines Herstellungsprozesses und umfangreiche Gleichstrom- und Hochfrequenzmessungen und deren Interpretation ein.

Bis jetzt wurden zwischen 800 GHz und 1.1 THz SIS-Mischer mit teilweise normalleitenden RF Anpassschaltungen, welche die Tunnelkontaktimpedanz an die der Hohlleiterantenne anpassen, verwendet. Der SMART Empfänger zum Beispiel ist mit  $NbTiN - Nb - Al/Al_xO_x - Nb - Al$  Mischerelementen ausgestattet wobei  $NbTiN$  die untere und  $Al$  die obere Schicht der RF Anpassschaltung bilden.  $Nb - Al/Al_xO_x - Nb$  Tunnelkontakte werden wegen ihrer überlegenen Barrierenqualität verglichen mit andern Materialkombinationen bevorzugt und auch in dieser Arbeit verwendet. Für die RF Anpassschaltung wird  $Nb$  nicht verwendet, da oberhalb seiner Energielückenfrequenz von 700 GHz Cooperpaare im  $Nb$  aufbrechen, was Verluste verursacht. Um einen rauscharmen Mischer mit diesem Tunnelkontakttyp zu realisieren, kommt ein anderes Material, idealerweise ein Supraleiter mit größerer Energielücke für die RF Anpassschaltung zum Einsatz.

In dieser Arbeit wird die Verwendung einer vollständig supraleitenden RF Anpassschaltung untersucht, wobei sowohl deren untere als auch obere Schicht aus  $NbTiN$  bestehen. In einer früheren Arbeit wurde eine erhöhte Elektronentemperatur im  $Nb$  Tunnelkontakt beobachtet, wenn an ihm eine Spannung angelegt war, was die Betriebseigenschaften des Mixers verschlechterte. In dieser Arbeit wird eine zusätzliche Goldschicht zwischen dem  $Nb$  Tunnelkontakt und der oberen  $NbTiN$ -Schicht der RF Anpassschaltung eingefügt. Diese Goldschicht ermöglicht Energieabfluss für die Quasipartikel, die von dem  $Nb$  Tunnelkontakt injiziert werden.



Eine wichtige Aufgabe im Rahmen dieser Arbeit war die Entwicklung eines Herstellungsprozesses für SIS Mischerelemente mit der zusätzlichen Goldschicht. Der entwickelte Prozess verwendet Elemente von bereits bewährten Herstellungsprozessen und erweitert diese um die ERL. Für die Strukturierung ausgedehnter Goldschichten wurde ein Elektronenstrahlolithographie(EBL)-Prozess entwickelt, unter Verwendung eines Zweilagensesistprozesses mit einer Kombination aus PMMA und einer PMMA/MMA Mischung. Zusätzlich wurde die Strukturierung der oberen Schicht der RF Anpassschaltung durch EBL zum ersten mal bei KOSMA als Standardprozedur implementiert, wobei UV5 als EBL Resist verwendet wurde.

Im ersten Schritt bestätigen Gleichstromkennlinien-Messungen dass die zusätzliche Goldschicht tatsächlich die Erhöhung der Elektronentemperatur im  $Nb$ -Tunnelkontakt eines  $NbTiN - Nb - Al/Al_xO_x - Nb - NbTiN$ -Mischerelements reduziert oder sogar verhindert. Eine Analyse der Gleichstromkennlinie liefert die stromabhängigen Werte der Elektronentemperatur und wie sie von der zusätzlichen Goldschicht beeinflusst werden. Der Einfluss der Goldschicht auf die Elektronentemperatur im Tunnelkontakt wurde für zwei verschiedene Konfigurationen untersucht. Erstens, wurde für eine auf die Tunnelkontaktfläche begrenzte Goldschicht der Einfluss deren Dicke auf die Elektronentemperatur untersucht. Zweitens, wurde für eine weit über die Tunnelkontaktfläche hinaus ausgedehnte Goldschicht der Einfluss ihrer lateralen Dimensionen auf die Elektronentemperatur untersucht. Es wurde gezeigt dass die Erhöhung der Elektronentemperatur durch Gleichstrom eliminiert werden kann, wenn das Volumen der Goldschicht ausreichend ist. Es zeigte sich dass für ein gewähltes Volumen die Geometrie (Dicke und laterale Form) einen entscheidenden Einfluss auf die Elektronentemperatur haben. Unterhalb einer bestimmten Dicke ist die ERL nicht mehr effektiv. Es wurde ein Modell zur Berechnung der ERL-Maße, die nötig sind um die Erhöhung der Elektronentemperatur zu verhindern, entwickelt. Es basiert auf einer Wärmetransportgleichung, die den Wärmefluss vom Tunnelkontakt zu den umgebenden Materialien beschreibt. Dabei dienen die Gleichstrommessungen als Eingangsdaten für die Berechnung. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse aus den Gleichstrommessungen genutzt um Hochfrequenz Mischerelemente für 800 GHz zu designen. Es wurden Testmischerelemente hergestellt und Hochfrequenzmessungen durchgeführt. Es wurden gepumpte Kennlinien (am Mischerelement ist eine Gleichspannung angelegt und es wird mit einem Lokaloszillator bestrahlt) von Mischerelementen mit und ohne ERL aufgenommen und eine Reduzierung der Erhitzung durch Hochfrequenzleistung für Mischerelemente mit ERL gegenüber solchen ohne ERL gefunden. Zusätzlich wurden Rauschtemperaturmessungen in einem Heterodyntestaufbau gemessen. Das Betriebsverhalten als Frequenzmischer wurde charakterisiert und die Daten wurden mit früheren Messungen von Mischerelementen für den SMART Empfänger verglichen. Eine Empfindlichkeitssteigerung des SIS Mis-



cherelements, welches in dieser Arbeit untersucht wurde, konnte noch nicht gezeigt werden. Dafür müssen der Testaufbau und die Stromdichte des Mischerelements vollständig optimiert werden. Dennoch konnte durch Vergleich mit Mischerelementen mit normalleitender oberer Elektrode der RF-Anpassschaltung experimentell gezeigt werden dass das Aufheizen des Tunnelkontakts durch Hochfrequenzstrahlung durch die zusätzliche Goldschicht reduziert wird. Das verspricht ein verbessertes Betriebsverhalten in einem optimierten Heterodynaufbau.





# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	THz Astronomy . . . . .	1
1.2	Heterodyne detection . . . . .	4
1.3	Superconducting Mixers . . . . .	5
1.3.1	Superconducting hot electron bolometer (HEB) mixers . . . . .	5
1.3.2	Superconductor Insulator Superconductor (SIS) mixers . . . . .	6
1.4	SIS mixers with Au energy relaxation Layer (ERL) . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Physics of SIS devices with energy relaxation layer</b>	<b>11</b>
2.1	SIS junctions . . . . .	11
2.1.1	DC-IV characteristic of an SIS junction device . . . . .	12
2.1.2	Temperature dependence of the gap voltage . . . . .	14
2.2	Andreev reflection, electron temperature elevation . . . . .	16
2.3	Energy relaxation and heat balance equation . . . . .	18
<b>3</b>	<b>SIS Device fabrication</b>	<b>21</b>
3.1	Basic fabrication techniques . . . . .	21
3.1.1	UV lithography . . . . .	21
3.1.2	Electron beam lithography (EBL) . . . . .	22
3.1.3	Magnetron Sputter Deposition . . . . .	25
3.1.4	Liftoff . . . . .	26
3.1.5	Reactive Ion Etching (RIE) . . . . .	28
3.1.6	Chemical mechanical planarization (CMP) . . . . .	29
3.2	The fabrication of mixer devices for 800 GHz . . . . .	31
3.2.1	NbTiN thin film optimization . . . . .	33
3.2.2	Junction area definition . . . . .	36
3.2.3	Au ERL definition by EBL . . . . .	40
3.2.4	Wiring layer definition by EBL . . . . .	42