

Michael Frommberger: Herstellung und Charakterisierung supraleitender Nb und NbN Hot-Electron Bolometer Mischerelemente. 2001

Für die Detektion der im THz-Frequenzbereich auftretenden schwachen Signale, ist das Frequenzmischen von großer Bedeutung. Typische Anwendungen sind in der Meteorologie, der Molekülspektroskopie, der Medizin und speziell in der Radioastronomie zu finden. Bis vor kurzem waren die meisten Empfänger für Frequenzen nahe und über 1.5 THz noch mit Schottky-Dioden-Mischerelementen ausgestattet, die jedoch eine niedrige Empfindlichkeit aufweisen. Rauscharme Supraleiter-Isolator-Supraleiter-(SIS)-Tunnelkontakte, die auf den Supraleiter Nb basieren, zeigten exzellente Mischereigenschaften und ersetzen heute Schottky-Mischer bis zu Frequenzen von 650 GHz. Vor kurzem zeigten NbTiN-SIS-Mischer gute Resultate bei Frequenzen bis zu 1 THz. Die Frequenzbeschränkungen hängen dabei mit der Energielücke des supraleitenden Materials zusammen. Die hohe Kapazität der SIS-Kontakte verlangt nach komplizierten Impedanzanpassungsstrukturen, die die Realisierung von rauscharmen SIS-Mischerelementen oberhalb der Energielückenfrequenz erschwert. Bei diesen Frequenzen wird eine hohe Quantenausbeute des SIS-Detektors durch Aufbrechen der Cooper-Paar-Bindungen in den Anpassungsstrukturen verhindert.

Diese Arbeit befasst sich mit supraleitenden Hot-Electron Bolometer (HEB)-Mischerelementen, die im THz-Bereich eine ernst zu nehmende Konkurrenz zu obengenannten Mixern darstellen. Diese Bauteile bestehen aus einer dünnen supraleitenden Mikrobrücke, die in eine planare Antenne oder Wellenleiterkopplungsstruktur integriert ist. Der Frequenzbereich dieser Mischer ist nicht durch die Energielücke des supraleitenden Materials beschränkt.

Frequenzmischen ist deshalb bis zu mehreren THz möglich. Im Allgemeinen spricht man heute von zwei Arten supraleitender HEBs, die sich in dem Kühlmechanismus der heißen Elektronen unterscheiden. Der Mechanismus in sogenannten diffusionsgekühlten HEBs (auf der Basis von Nb oder Al) beruht auf der schnellen Diffusion der Elektronen in gut wärmeleitende, normalleitende Kühlkontakte. Diese Bauteile benötigen extrem kurze Mikrobrücken. In phononengekühlten HEBs (typischerweise aus NbN, NbTiN oder auch $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) basiert der Kühlmechanismus hauptsächlich auf der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Phononen. Sehr dünne supraleitende Filme und angepasste Substrate sind hier wichtig, um ein schnelles Entweichen der angeregten Phononen aus der Mikrobrücke zu ermöglichen.

In den letzten Jahren sind einige viel versprechende Ergebnisse mit HEB-Mixern präsentiert worden. Dennoch ist wenig über die für gute Bauteile nötigen Eigenschaften der supraleitenden Filme und die damit verbundenen Herstellungsprobleme veröffentlicht worden. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit war es daher, die kristallinen und supraleitenden Eigenschaften der für phononen- bzw. diffusionsgekühlten HEBs verwendeten dünnen NbN- bzw. Nb-Schichten zu untersuchen. Diese Eigenschaften hängen stark von den durch die Depositionsparameter gegebenen Wachstumsbedingungen, der Wahl des Substratmaterials und verschiedensten Einflüssen während der Strukturierungsprozesse ab. Die Ergebnisse der Charakterisation der Dünnschichten erlaubten dabei das Aufstellen von Layout-Bedingungen für die Strukturierung der HEB-Mikrobrücken. Zu einem gewissen Grad wurde dadurch auch die Möglichkeit gegeben, die späteren Mischereigenschaften des Bauteils vorherzusagen und zu optimieren.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit widmet sich der Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Fabrikation von supraleitenden HEBs. Diese Prozesse basieren auf herkömmlichen Verfahren der Mikroelektronik, wie z.B. die Photolithographie und reaktives Ionenätzen. Auch wurden zwei spezielle Methoden der Mikrostrukturierung, die hochauflösende Elektronenstrahl-Lithographie und die Lithographie mittels eines fokussierten Ionenstrahls verwendet. Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten HEBs wurden mit Gleichstrommessungen und in Hochfrequenzexperimenten charakterisiert. Mit einem diffusionsgekühlten Nb-HEB wurde in Mischerexperimenten bei 800 GHz eine unkorrigierte DSB-(double side band)-Empfängerrauschtemperatur von etwa 4000 K erreicht. Die relativ hohe Rauschtemperatur lässt sich durch die starke Fehlanpassung der Impedanz der

Mikrobrücke an die verwendete Antenne erklären, welche ursprünglich für typische NbN-HEB-Impedanzen entworfen wurde. Baugleiche HEBs zeigten in einer Impedanzmessung eine Zwischenfrequenzbandbreite von 4.3 GHz. Diese Ergebnisse sind sehr viel versprechend. Die phononengekühlten NbN-HEBs wurden auf amorphen Quarz-Substraten unter Verwendung einer MgO-Keimschicht hergestellt. Mit diesen neuartigen Detektoren wurde in Mischereperimenten bei 800 GHz eine korrigierte Empfängerrauschtemperatur von 675 K DSB und eine Zwischenfrequenzbandbreite von 1.8 GHz erreicht. Im Vergleich zu herkömmlichen NbN-HEBs, hergestellt auf amorphem Quarz, verbesserte das Verwenden der MgO-Keimschicht die Mischereigenschaften entscheidend.

Frequency mixing is of great importance for the detection of the very weak signals occurring in the THz frequency range. Applications can be found for example in meteorology, molecule spectroscopy, medicine and in particular in radio astronomy. Until recently most receivers for frequencies near and above 1.5 THz had to rely on Schottky-diode mixers, with rather poor sensitivity. Low noise Superconductor-Isolator-Superconductor (SIS) mixers based on superconducting Nb have excellent performance and have replaced Schottky-diode mixers for frequencies up to about 650 GHz, corresponding to the energy gap of niobium. Lately SIS junctions based on NbTiN have shown good results at frequencies up to 1 THz. Since the capacity of SIS junctions imposes dedicated integrated impedance matching circuits it is difficult to realise SIS mixers with low noise temperatures above the gap frequency of the superconducting material. For such frequencies the losses due to Cooper pair breaking in the matching circuit prevent high quantum yield in the SIS detector.

This thesis reports on superconducting Hot-Electron Bolometer (HEB) mixers which have recently emerged as a serious alternative to the traditional mixers used in THz receivers. These devices consist of a thin superconducting microbridge integrated into a planar antenna or waveguide coupling structure. The frequency range of those devices is not limited by the energy gap of the superconductor and therefore frequency mixing is possible up to several THz. In general, one distinguishes today two types of superconducting HEBs, differing in the cooling mechanism for the hot electrons. The cooling mechanism in diffusion cooled HEBs (Nb, Al) is based on the fast out-diffusion of the hot electrons into high thermal conductivity normalconducting contacts. This requires extremely short microbridges. Phonon cooled HEBs (NbN, NbTiN, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) are mainly cooled by electron-phonon interaction. Very thin superconducting films and adapted substrates are needed to ensure that the excited phonons immediately escape into the substrate.

Although many promising superconducting HEB mixer results have been presented in recent years, little has been published about the required thin film qualities and their related processing problems. A major part of this thesis was therefore to study the crystalline and superconducting properties of thin NbN and Nb films which were used for the fabrication of phonon and diffusion cooled devices. These properties strongly depend on the growth conditions of the thin films due to the deposition parameters, environmental conditions during processing and the choice of the substrate material. The different studies allowed to define the layout parameters for fabrication and allowed also, to a certain extent, to predict and optimize the later device performance.

Another part of this thesis treats the development and optimization of fabrication processes for superconducting HEB devices. These processes include standard micro-electronic techniques such as photolithography and reactive ion etching, but also particular methods of microlithography such as high resolution electron-beam lithography and focused ion beam technique. The fabricated HEB devices have been characterized in DC- and high frequency measurements. With a diffusion cooled Nb HEB, heterodyne mixing experiments at 800 GHz have shown an uncorrected double sideband (DSB) receiver noise temperature T_n of about 4000 K. The rather high noise temperature is related to the strong impedance mismatch between the Nb HEB and the antenna impedance, initially designed for typical NbN HEB impedances. A similar device has shown an intermediate frequency (IF) gain bandwidth of 4.3 GHz in an impedance measurement setup. These results are very promising. The

phonon cooled NbN HEBs were produced on fused quartz substrates utilising an MgO seed layer. This novel devices showed a T_n of 675 K DSB and an IF-gain bandwidth of 1.8 GHz at 800 GHz. Compared to NbN HEBs directly produced on fused quartz, the MgO seed layer significantly improved the mixer performance.