

Abstract

To fully exploit the benefit of the quantum limited performance of superconducting mixing devices, a high coupling efficiency from the device to a free space wave is of utmost importance. A very efficient coupling to telescope optics is achieved by a waveguide feed horn. The waveguide feed horn transforms the free space wave to a waveguide mode. A waveguide probe then transforms the waveguide mode to a stripline mode which is coupled to the mixing device which is typically a Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS) tunnel junction or a superconducting Hot Electron Bolometer (HEB) microbridge at astronomical heterodyne receivers.

This thesis describes the design, optimization and analysis of waveguide mixer Radio Frequency (RF) environments which includes the waveguide, the waveguide probe (antenna) and the feed horns. Of particular importance for the modeling work here presented is the 3-D electromagnetic simulation software (CST Microwave Studio[®]) which is a relative new approach in the field. The reason for this is that recently sufficient computing power and memory has become available for PCs to model complex structures within reasonable time. This approach allows a much improved design, fabrication, tolerance analysis and measurement cycle because conventional, very time consuming scale model measurements can be completely replaced by the 3-D computer model.

The novel design method was initially utilized to optimize a waveguide probe for application in the Band 2 mixer which is developed at the Kölner Observatorium für Submillimeter Astronomie (KOSMA) and is part of the Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI) on the Herschel Space Observatory (HSO). This mixer requires efficient coupling to the SIS mixing device over a large frequency range (636-802 GHz).

The Band 2 mixer was completely developed, fabricated and tested to stringent space qualification procedures at KOSMA. During the selection of the HIFI Band 2 devices, many mixers were tested confirming the quality of the probe design. The three flight mixer units delivered in 2005 are state-of-the-art SIS mixers. The mixer noise temperatures are around 100 K for 80% of their frequency band.

With the experience gained from the HIFI Band 2 mixer design, new waveguide environments for additional submm SIS and Terahertz (THz) frequency HEB mixers were developed. These mixers are to be used e.g. in the SubMillimeter Array Receiver for Two frequencies (SMART) (440-495 GHz and 795-885 GHz) and the German Receiver for Astronomy at Terahertz frequencies (GREAT) aboard on the

Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) at 1.9 THz. The CO N⁺ Deuterium Observations Receiver (CONDOR) was successfully operated at the Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) telescope at 1.5 THz. The waveguide environment design of the CONDOR mixer is also a result of this thesis. Several measurements of these mixers were conducted which also successfully verified the simulated frequency band.

Corrugated feed horns deliver the best coupling to a fundamental mode of a Gaussian beam with the lowest cross-polarization levels. All HIFI waveguide mixers use this type of horn in order to achieve highest performance levels. Within this thesis, horn beam pattern measurements were performed in order to verify their performance. The feed horn manufacturing process for HIFI and the cleanliness measures were optimized as a result of this verification, in order to achieve the designed beam patterns.

To provide an alternative to the corrugated feed horns, which are difficult to fabricate at submm wavelength, this thesis introduces a smooth-walled spline-profiled feed horn designed by the Centre for Information and Communication Technologies (ICT) of the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, Australia) to the submm and THz community. As will be demonstrated, its performance is very comparable to the corrugated horns but their manufacturing process is much simplified due to the lack of corrugations. At THz frequencies smooth-walled horns are regarded as the best alternative. Therefore a smooth-walled spline-profiled horn is implemented in GREAT.

With the proven 3-D simulation and development environment, more involved waveguide mixer designs can be approached as a next step. Currently most important is a design for a sideband separation (2SB) mixer. A 2SB mixer is a heterodyne mixer where both sidebands are separately accessible at the intermediate frequency. The waveguide technology offers the possibility to realize a 2SB mixer very compact and with a broad RF bandwidth without mechanical tuning elements. All necessary RF components for the 2SB mixer are modeled in 3-D electromagnetic software as part of this thesis and are optimized by considering manufacturing constraints. The key component of a 2SB mixer, a hybrid coupler with a 90 degree phase shift at the outputs, is thoroughly investigated as a prototype by Vector Network Analyzer (VNA) measurements at 345 GHz. The measurement result confirms the sufficient accuracy of the design and manufacturing method.

Zusammenfassung

Um die quantenlimitierte Empfindlichkeit supraleitender Mischer vollständig ausnutzen zu können, ist eine bestmögliche Ankopplung des Mischerelements an die Freiraumwelle von besonderer Bedeutung. Eine effiziente Kopplung an die Optik des Teleskops wird mit einem Hornstrahler erreicht, der die Freiraumwelle in eine Hohlleiterwelle transformiert. Eine Hohlleitersonde (probe) wandelt diese dann in eine Streifenleitermode um, welche an das Mischerelement ankoppelt. Dieses ist bei astronomischen Heterodyn-Empfängern in der Regel ein Supraleiter-Isolator-Supraleiter (SIS) Tunnelelement oder ein supraleitendes Hot-Electron-Bolometer (HEB).

Die vorliegende Arbeit beschreibt das Design, die Optimierung und die Analyse der Hochfrequenzumgebung von Hohlleitern. Dies beinhaltet den Hohlleiter, die Hohlleitersonde und den Hornstrahler. Besondere Bedeutung kommt dabei der 3-D Simulationssoftware (CST Microwave Studio[®]) für elektromagnetische Felder zu. Deren Verwendung ist ein relativ neuer Ansatz zur Berechnung der gezeigten Bauteile, denn PCs mit ausreichend Rechenleistung und Arbeitsspeicher stehen erst seit kurzem zur Verfügung. Das 3-D Computermodell erlaubt wesentlich verbesserte Analysen von Design, Fertigung und Toleranzen und ersetzt aufwändige Messungen an skalierten Modellen.

Die neuartige Design-Methode wurde zur Optimierung des Band 2 Mischers für das 'Heterodyne Instrument for the Far-Infrared' (HIFI) auf dem 'Herschel Space Observatory' (HSO) eingeführt. Der Mischer wurde am Kölner Observatorium für Submillimeter Astronomie (KOSMA) entwickelt und benötigt über eine große Bandbreite (636-802GHz) eine hohe Kopplungseffizienz zu dem SIS Mischerelement.

Der Band 2 Mischer wurde vollständig von KOSMA entwickelt und nach strengen Vorgaben auf Weltraumtauglichkeit getestet. Während der Auswahl der Mischerelemente wurden viele Testmessungen durchgeführt. Dabei wurde das Design der Hohlleitersonde bestätigt. Die drei in 2005 gelieferten 'Flight' Mischer entsprechen dem heutigen Stand der Technik, so liegen die Mischer-Rauschtemperaturen für 80% ihres Frequenzbandes um 100K.

Mit den im Design des HIFI Band 2 Mischers gewonnenen Erfahrungen wurden neue Hohlleiterumgebungen für weitere Submm SIS und HEB Mischer bei Terahertz (THz) Frequenzen entwickelt. Diese Mischer werden beispielsweise im 'SubMillimeter Array Receiver for Two frequencies' (SMART) (440-495GHz und 795-885GHz) und im 'German Receiver for Astronomy at Terahertz frequencies'

(GREAT) an Bord des 'Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy' (SOFIA) bei 1.9 THz verwendet. Der CO N⁺ Deuterium Observations Receiver (CONDOR) wurde erfolgreich am 'Atacama Pathfinder EXperiment' (APEX) Teleskop bei 1.5 THz eingesetzt. Die Hohlleiterumgebung des CONDOR Mischers wurde im Rahmen dieser Arbeit entworfen. Durch Messungen an einigen dieser Mischer wurde das jeweilig berechnete Frequenzband bestätigt.

Rillenhörner liefern die beste Ankopplung an die Grundmode eines Gaußstrahls mit geringem kreuzpolarisiertem Anteil. Sie kommen bei allen Hohlleitern für HIFI zum Einsatz, um eine maximale Performance zu erreichen. Ihre Qualität wurde im Rahmen dieser Arbeit durch Messungen der Strahlungscharakteristik überprüft. Im Ergebnis dieser Messungen wurden der Herstellungsprozess für HIFI sowie die Reinheitskriterien optimiert, um die berechnete Strahlungscharakteristik zu gewährleisten.

Als Alternative zu den Rillenhörnern, welche bei submm-Wellenlängen schwierig herzustellen sind, beschreibt diese Arbeit für die Anwendung bei THz Frequenzen ein glattwandiges Horn mit einem Kurvenprofil. Das Horn wurde im 'Centre for Information and Communication Technologies' (ICT) der 'Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization' (CSIRO, Australia) entworfen. Es wird gezeigt, dass die Performance vergleichbar der des Rillenhorns, jedoch die Herstellung aufgrund der glatten Wände wesentlich unkomplizierter ist. Glattwandige Hörner werden bei THz-Frequenzen als beste Alternative angesehen und sie finden daher Verwendung in GREAT.

Mit der bewährten 3-D Berechnungs- und Entwicklungsumgebung können nun umfangreichere Hohlleiter-Mischerdesigns realisiert werden. Dem Entwurf eines Mischers, der die beiden Seitenbänder auf der Zwischenfrequenz-Seite trennt (2SB Mischer), gilt derzeit die höchste Priorität. Solch ein Mischer kann in Hohlleitertechnik sehr kompakt realisiert werden und bedarf selbst bei großen Hochfrequenzbandbreiten keine mechanischen Abstimmeelemente. Alle benötigten Hochfrequenzbauteile wurden in Rahmen dieser Arbeit mit der 3-D Software modelliert und unter Berücksichtigung der Herstellungsprozesse optimiert. Das zentrale Bauteil des 2SB-Mischers, ein Richtkoppler mit 90° Phasenverschiebung an den Ausgängen, wurde als Prototyp durch Messungen bei 345 GHz an einem Vektor-Netzwerk-Analysator (VNA) ausführlich untersucht und damit die hinreichende Genauigkeit von Design- und Herstellungsverfahren bestätigt.