

ac Josephson Effect in  
Nb/InAs(2DES)/Nb Junctions

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von  
Kay Biedermann  
aus Hamburg

Hamburg  
2000

Gutachter der Dissertation:

Professor Dr. U. Merkt  
Professor Dr W. Hansen

Gutachter der Disputation:

Professor Dr. U. Merkt  
Professor Dr. D. Heitmann

Datum der Disputation:

14. September, 2000

Sprecher des Fachbereichs  
Physik und Vorsitzender  
des Promotionsausschusses:

Professor Dr. F.-W. Büber

Berichte aus der Physik

**Kay Biedermann**

**ac Josephson Effect in  
Nb/InAs(2DES)/Nb Junctions**

Shaker Verlag  
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Biedermann, Kay:*

ac.Josephson Effect in Nb/InAs(2DES)/Nb Junctions/

Kay Biedermann. Aachen: Shaker, 2000

(Berichte aus der Physik)

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8050-8

Copyright Shaker Verlag 2000

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8050-8

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 1290 • D-52013 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Für meine Eltern und meine Schwester



---

# Inhaltsangabe

In dieser Arbeit werden Supraleiter/Normalleiter/Supraleiter (SNS) Josephsonkontakte untersucht. Als Barriere dient ein zweidimensionales Elektronengas, entweder an der Oberfläche von InAs-Einkristallen oder in InAs-Heterostrukturen. Als Supraleiter wird Nb verwendet. Ziel ist es, unsere Josephsonkontakte on-chip als lokale Mikrowellenquellen zu nutzen. Unsere Kontakte weisen zwei Besonderheiten auf. Erstens, hohe  $I_C R_N$ -Produkte von über 1 mV. Zweitens ihre integrierten Mikrowellenresonatoren gebildet aus dem Überlapp zweier Nb-Elektroden mit einem anodischen Oxid dazwischen. In den ersten beiden Kapiteln werden ausschließlich Kontakte auf InAs-Einkristallen untersucht. Im ersten Kapitel wird kurz der dc Josephson-Effekt solcher SNS-Kontakte beschrieben, gefolgt von systematischen Untersuchungen zu deren ac Josephson-Effekt. Unter Einstrahlung einer hochfrequenten, elektromagnetischen Welle werden Shapiro-Stufen in den Strom-Spannungskennlinien beobachtet. Die Abhängigkeit der Stufenbreiten von der eingestrahlten Leistung wird sowohl mit der Theorie für spannungsgespeiste, als auch für stromgespeiste Josephsonkontakte verglichen. Im letzten Fall wurde erstmalig der beobachtete Excess-Strom unserer Kontakte mittels einer mikroskopischen Theorie in ein phänomenologisches RCSJ-Modell integriert. Der integrierte Resonator wechselwirkt mit der Josephsonstrahlung der Kontakte, was zu Fiskeresonanzen in den Strom-Spannungskennlinien führt. Die Magnetfeld-, Temperatur- und Hochfrequenz-Abhängigkeit der Resonanzamplituden kann in einem modifiziertem RSJ-Modell beschrieben werden. Es berücksichtigt die besondere Geometrie unserer Kontakte, in denen der Strom des Kontaktes nur an einer Seite in und aus dem Resonator fließt. Desweiteren ist das Modell für beliebige Stromverteilungen gültig. Die Beobachtung von halbzahligen Shapirostufen und Fiskeresonanzen kann mittels einer  $\sin(2\varphi)$ -Komponente in der ersten Josephson-Gleichung verstanden werden. Eine solche Stromkomponente hängt mit dem Auftreten von Nichtgleichgewicht in unseren Kontakten zusammen. Im zweiten Kapitel wird die hochfrequente Kopplung zweier Kontakte untersucht. Ein Kontakt dient als Sender und der andere als Empfänger. Beide sind über einen supraleitenden Streifenleiter miteinander gekoppelt. Es wurden zwei verschiedene geometrische Designs hergestellt und untersucht. Bei beiden sind die Impedanzen der Kontakte und des Streifenleiters möglichst gut aufeinander angepaßt. Für beide Designs wird ein induktives Überkoppeln vom Sender auf den Empfänger beobachtet, welches mittels vergleichender Messungen mit angelegtem Magnetfeld nachgewiesen werden kann. Deswegen wurde im letzten Teil versucht, einen halbleitenden, mesoskopischen Quantenpunkt-Kontakt als Detektor zu nutzen. Der Transport durch ihn ist unempfindlich gegen die kleinen Magnetfelder des Sendekontaktes, kann aber durch kleine ac Felder beeinflusst werden. Es wird die zugehörige Theorie zur dc- und ac-Leitfähigkeit beschrieben, und verschiedene Meßmethoden werden vorgestellt. Am Ende werden erste Meßergebnisse gezeigt.

---

## Abstract

In this thesis superconductor/normalconductor/superconductor (SNS) Josephson junctions are studied. A two-dimensional electron system serves as barrier either at the surface of InAs single crystals or in InAs heterostructures. As superconductor Nb is employed. The aim is to use our Josephson junctions as on-chip integrated local microwave sources. Our junctions show two particularities. First, their high  $I_C R_N$ -products of more than 1 mV. Second, their integrated microwave resonator built by the overlap of two Nb electrodes with an intermediate anodic oxide. In the first two chapters the junctions on InAs single crystals are investigated. In the first chapter the dc Josephson effect of these SNS junctions is briefly described, followed by comprehensive investigations of their ac Josephson effect. Under irradiation of rf waves Shapiro steps are obtained in the current-voltage characteristics. The dependence of their step widths on the irradiation power is compared with the theory for the voltage-biased as well as for current-biased junctions. In the latter case, for the first time the observed excess current of our junctions is integrated in a phenomenological RCSJ model by a microscopic theory. The integrated resonator interacts with the Josephson radiation leading to Fiske resonances in the current-voltage characteristics. The magnetic field, temperature and high-frequency dependence of the resonance amplitudes can be described in a modified RSJ model. It takes into account the special geometry of our junctions in which the current flows only at one edge into and out of the resonator. Moreover, the model is valid for arbitrary current distributions. The observation of half-integer Shapiro steps and Fiske resonances can be understood by a  $\sin(2\varphi)$ -component in the first Josephson equation. This current component is related to the appearance of nonequilibrium in our junctions. In the second chapter the high-frequency coupling of two junctions is investigated. One junction acts as transmitter and the other one as receiver both coupled by a superconducting microstrip. Two different geometric designs are prepared and investigated. For both the impedances of the junctions and the microstrip are matched to each other as good as possible. For both designs an inductive influence from the transmitter onto the receiver is observed which is proved by comparison to measurements with applied magnetic field. Therefore, in the last part it was tried to use a semiconducting, mesoscopic quantum point contact as detector. The transport through it is unaffected by the small magnetic fields of the transmitter junction but can be influenced with small ac fields. The corresponding theory of the dc and ac conductivity is presented and different measuring methods are introduced. At the end first measurements are shown.

---



---

# Contents

<b>Inhaltsangabe</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Single Junction Properties</b>	<b>3</b>
2.1 Preparation . . . . .	3
2.2 dc Josephson Effect . . . . .	6
2.3 High-Frequency Irradiation . . . . .	11
2.3.1 Voltage Bias . . . . .	11
2.3.2 Current Bias . . . . .	12
2.3.3 Experimental Results . . . . .	13
2.4 Self Resonances . . . . .	15
2.4.1 RSJ Model and Magnetic-field Dependence . . . . .	16
2.4.2 Temperature Dependence and rf Irradiation . . . . .	24
2.5 Nonequilibrium Effects . . . . .	27
<b>3 Coupled Junctions</b>	<b>31</b>
3.1 Striplines . . . . .	32
3.1.1 Structure and Approximations . . . . .	32
3.1.2 Dimensioning . . . . .	34
3.2 Design and Preparation . . . . .	36
3.2.1 Investigated Designs . . . . .	36

---

3.2.2	Simulations for Design 2 . . . . .	41
3.3	Design 1: Experimental Results . . . . .	46
3.4	Design 2: Experimental Results . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Quantum Point Contacts as Detectors</b>	<b>57</b>
4.1	Preparation . . . . .	57
4.2	dc Conductivity of a Quantum Point Contact . . . . .	62
4.3	ac Conductivity of a Quantum Point Contact . . . . .	64
4.4	Preliminary Results . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Conclusions and Outlook</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>76</b>
	<b>List of Publications</b>	<b>83</b>
	<b>Acknowledgements</b>	<b>84</b>

---

---

# List of Figures

<b>Fig. 1:</b> Single junction . . . . .	4
<b>Fig. 2:</b> Preparation steps for a single junction . . . . .	5
<b>Fig. 3:</b> Reflection mechanism at the S/N interface . . . . .	6
<b>Fig. 4:</b> Andreev bound states . . . . .	7
<b>Fig. 5:</b> Derivatives of the CVCs for different temperatures . . . . .	8
<b>Fig. 6:</b> SNcNS model after Aminov <i>et al.</i> . . . . .	9
<b>Fig. 7:</b> Temperature dependence of the critical current . . . . .	10
<b>Fig. 8:</b> Extended RCSJ model: equivalent electric circuit . . . . .	12
<b>Fig. 9:</b> Simulated CVC in the extended RCSJ model without rf irradiation . . . . .	13
<b>Fig. 10:</b> Comparison between simulations and experiment of the Shapiro step width in the current bias case . . . . .	14
<b>Fig. 11:</b> Temperature dependence of the step amplitude of the Fiske resonances . . . . .	24
<b>Fig. 12:</b> Temperature dependence of the step amplitude compared to the one of the critical current . . . . .	25
<b>Fig. 13:</b> rf power dependence of the step amplitude of the n=1 resonance compared to the one of the critical current . . . . .	26
<b>Fig. 14:</b> Supercurrent and its Fourier components after Argaman . . . . .	29
<b>Fig. 15:</b> Schematic view of the microstrip . . . . .	32
<b>Fig. 16:</b> Description of the microstrip in the static approximation . . . . .	33
<b>Fig. 17:</b> Schematic view of Design 1 . . . . .	37
<b>Fig. 18:</b> Overview of the preparation of Design 1 . . . . .	38
<b>Fig. 19:</b> Schematic view of Design 2 . . . . .	39
<b>Fig. 20:</b> Overview of the preparation of Design 2 . . . . .	40

---

---

<b>Fig. 21:</b> Design 2: Equivalent electric circuit . . . . .	41
<b>Fig. 22:</b> Frequency dependence of the ac voltage amplitude in the extended RCSJ model . . . . .	42
<b>Fig. 23:</b> Impedances in the simulation of Design 2 . . . . .	44
<b>Fig. 24:</b> Emitted and transmitted power for Design 2 . . . . .	45
<b>Fig. 25:</b> Electric wiring for measuring a rf coupling between two junctions . . . . .	46
<b>Fig. 26:</b> Direct and differential receiver CVCs for different transmitter bias voltages for Design 1 . . . . .	47
<b>Fig. 27:</b> Critical current of the receiver in Design 1 affected by the transmitter and a magnetic field . . . . .	48
<b>Fig. 28:</b> Step amplitudes of the n=1 and n=2 Fiske resonance of the receiver for Design 1 . . . . .	49
<b>Fig. 29:</b> Inductive coupling between transmitter and receiver for Design 1 . . . . .	50
<b>Fig. 30:</b> CVCs of the receiver for different transmitter bias voltages for the Design 2 . . . . .	51
<b>Fig. 31:</b> Inductive coupling between transmitter and receiver for Design 2 . . . . .	52
<b>Fig. 32:</b> Mutual phase locking of two junctions . . . . .	53
<b>Fig. 33:</b> Measurements of a possible mutual phase locking between both junctions . . . . .	54
<b>Fig. 34:</b> Schematic view of the coupling of a SNS and SIS junction . . . . .	55
<b>Fig. 35:</b> InAs heterostructure developed by A. Richter . . . . .	58
<b>Fig. 36:</b> Schematic view of the split-gate QPC and the junction . . . . .	59
<b>Fig. 37:</b> Preparation steps of the on-chip integration of a QPC and a Josephson junction . . . . .	60
<b>Fig. 38:</b> Phase-contrast picture of the realized design . . . . .	61
<b>Fig. 39:</b> Schematic view of a QPC in the real space . . . . .	62
<b>Fig. 40:</b> Energy dispersion $E(k_x)$ of a QPC in the $k$ -space . . . . .	63
<b>Fig. 41:</b> Photon-assisted tunneling in a QPC . . . . .	65
<b>Fig. 42:</b> Theoretical results for the ac conductivity of a QPC after Feng and Hu . . . . .	66
<b>Fig. 43:</b> CVC of a Josephson junction on an InAs heterostructure at 255 mk . . . . .	68
<b>Fig. 44:</b> Gate-voltage dependence of the dc conductance of a QPC . . . . .	70
<b>Fig. 45:</b> Gate-voltage dependence of the leakage currents . . . . .	71

---

---

<b>Fig. 46:</b> Gate-voltage dependence of the resistance and conductance of a second QPC . . . . .	72
---	----