

DISS. ETH Nr° 18314

**Engineering Quantum Electronic Chips -  
Realization and Characterization of  
Circuit Quantum Electrodynamics Systems**

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH  
for the degree of  
DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

presented by  
MARTIN VOLKER GÖPPL  
DIPLOM-PHYSIKER (UNIV.), TU MÜNCHEN  
date of birth  
November 10, 1980  
citizen of  
Bayern, Deutschland

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Andreas Wallraff  
Prof. Dr. Per Delsing

2009



# Kurzfassung

Im Rahmen der Quantenelektrodynamik in elektronischen Schaltkreisen (*Circuit Quantum Electrodynamics* oder kurz *Circuit QED*) werden einzelne Mikrowellenphotonen mittels koplanaren Wellenleitern an supraleitende *Quantenbits* (kurz *Qubits*) gekoppelt. Hierbei können Kopplungsstärken erreicht werden, welche sich in klassischen Quantenoptiksystemen nur schwer realisieren lassen. Innerhalb dieser Arbeit wurden Circuit QED Systeme entworfen und im Reinraumzentrum FIRST ([www.first.ethz.ch](http://www.first.ethz.ch)) hergestellt. Zu diesem Zweck wurden Dünnschichtprozesse zur Fabrikation mikro- und nanoelektronischer Bauelemente erfolgreich entwickelt und optimiert, was die Durchführung einer Reihe von neuartigen Experimenten ermöglichte.

Supraleitende Qubits bestehen hier aus Aluminium/Aluminiumoxid-Josephson-Tunnelkontakten und werden in koplanare Wellenleiter integriert. Diese Resonatoren werden mittels optischer Lithographie und reaktivem Ionenätzen im Falle von Niob-Strukturen bzw. mittels optischer Lithographie und Elektronenstrahlverdampfung im Falle von Aluminium-Strukturen hergestellt. Mikrowellenresonatoren mit Fundamentalfrequenzen zwischen 2 und 9 GHz und Qualitätsfaktoren im Bereich von einigen hundert bis zu einigen hunderttausend wurden realisiert und bei Temperaturen von 20 mK elektrisch charakterisiert. Transmissionsspektren sind in guter Übereinstimmung mit theoretischen Modellen.

Die Herstellung von Josephson-Tunnelkontakten mit kontrollierten Parametern wie Josephson- und Ladungsenergie ist Voraussetzung zur Realisierung supraleitender Qubits mit definierten intrinsischen Energieniveaus. Insbesondere müssen maximale Qubit-Übergangsfrequenz, Anharmonizität, Ladungsdispersion und Kopplungsstärke zwischen Qubit und Resonator präzise kontrolliert werden, um ein spezifisches Circuit QED Experiment durchführen zu können. Dies erfordert wiederum gut kontrollierbare Fabrikationsprozesse. Josephsonkontakte werden mittels Elektronenstrahl-Lithographie und Schattenbedampfung hergestellt. Prozesse wurden implementiert und Prozessparameter wie Belichtungsdosis und Aluminium-Oxidationszeit kalibriert. Elektrische- und Materialeigenschaften von Josephson-Tunnelkontakten wurden bei Raumtemperatur und Millikelvin-Temperaturen untersucht. Darüber hinaus wurden Resonatoren, deren Resonanzfrequenz mittels eines äusseren Magnetfeldes abstimmbare ist, durch Integration von Josephson-Tunnelkontakten hergestellt.

Circuit QED Systeme mit definierten Eigenschaften wurden erfolgreich hergestellt und charakterisiert. In Hinblick auf eine zukünftige Quantencomputer-Architektur wurde die Kopplung zweier Qubits über einen Mikrowellenresonator in Abhängigkeit der Verstimmung beider Qubit-Frequenzen zur Resonatorresonanz untersucht. Die Kopplungsstärke kann hier unter Einbezug höherer Resonatormoden erklärt werden. Schliesslich wurden Experimente zur spektroskopischen Bestimmung der *Jaynes-Cummings Energieniveaus*, des *Lamb-Shifts* sowie von *Autler-Townes- und Mollow-Übergängen* ermöglicht. In weiteren Experimenten wurden *verschränkte Zwei-Qubit Zustände* erzeugt und charakterisiert.



# Abstract

*Circuit quantum electrodynamics (circuit QED)* studies the strong coupling of microwave photons stored in a transmission line cavity to superconducting qubits on the level of single quanta and realizes coupling strengths which can hardly be achieved in atomic cavity QED systems. Within the scope of this thesis, micro- and nano-fabrication processes for the realization of circuit QED systems have been successfully realized and optimized in the ETH clean room facility FIRST. These achievements allowed to perform a number of new circuit QED experiments.

The circuit QED systems discussed here consist of aluminum/aluminum-oxide Josephson junction qubits integrated into superconducting coplanar waveguide resonators. The physical properties of high quality resonators, made by using optical lithography and reactive ion etching of niobium or evaporation of aluminum thin films were analyzed in detail. In particular, resonators with fundamental frequencies from 2 to 9 GHz and quality factors ranging from a few hundreds to several hundred thousands controlled by appropriately designed input and output coupling capacitors were realized, their microwave transmission spectra were measured at temperatures of 20 mK and well described with theoretical lumped element and distributed element transmission matrix models.

The ability to realize superconducting qubits with precisely controlled properties like Josephson energy and charging energy is essential for defining a certain qubit energy level structure. In particular, the maximum qubit transition frequency, the level of anharmonicity, the charge dispersion and the coupling strength between qubit and cavity must be controlled in order to perform a specific circuit QED experiment. This in turn requires a high level of control over the applied fabrication procedures. Josephson junctions were fabricated by using electron beam lithography and shadow evaporation. Fabrication processes were set up and process parameters like resist exposure dose and junction oxidation time were calibrated. Electrical and material properties of aluminum/aluminum-oxide Josephson junctions like the room temperature tunnel resistance, the current-voltage characteristic at milli-Kelvin temperatures or the resistance alteration with time due to post-oxidation processes (*junction aging*) were studied. The development of tunable coplanar waveguide resonators with integrated direct current superconducting quantum interference devices (DC-SQUIDs) with which the resonator frequency can be varied by an external magnetic flux threading the SQUID loop has been started and transmon type qubits have been designed and fabricated for performing circuit QED experiments.

The ability to realize circuit QED systems with controlled parameters has been demonstrated by fabricating and characterizing circuit QED devices with one or several transmon type qubits integrated into a transmission line cavity. To realize qubit-qubit coupling in quantum computer architectures, the virtual photon exchange between two qubits in a transmission line cavity has been studied in dependence on the detuning of both qubits from the cavity resonance. The qubit-qubit interaction strength is explained by taking into account higher order cavity modes. Furthermore, experiments were enabled where the *Jaynes-Cummings energy ladder*, the *Lamb shift*, the *Mollow triplet* and the *Autler-Townes doublet* were spectroscopically observed in a circuit QED system and where *two-qubit entangled states* were prepared and characterized using *quantum state tomography*.