

DISS. ETH NO. 23835

Microwave photonics in superconducting circuits

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Marek Pechal
MSc ETH Physics, ETH Zurich
born on 16.04.1987
citizen of the Czech Republic

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Andreas Wallraff, examiner
Prof. Dr. Jonathan Home and Prof. Dr. Konrad Lehnert, co-examiners

2016

Abstract

This thesis presents the main results of my work in the Quantum Device group, dealing mainly with the generation and manipulation of microwave photons in superconducting circuits and their use for quantum information processing. Photons, whether confined in a resonant cavity or propagating in an open transmission line, can be used as mediators of interaction and carriers of quantum information among spatially separated quantum bits.

The first experimental chapter of this work describes a proof-of-principle experiment in which we used the cyclic evolution of a single discrete mode of a 3d cavity to realize a two-qubit phase gate. This type of quantum gate can be easily generalized to more than two qubits but in our case was found to be limited by the current coherence properties of the used samples. Therefore, we did not deem it suitable as a replacement for other well established implementations of multi-qubit gates.

The subsequent chapters present experiments on the generation of single microwave photons with a controllable temporal shape and the possibility of their efficient reabsorption by a quantum system. We demonstrate a photon shaping scheme which, in contrast with other recently realized protocols that require fast flux control of the sample, is fully controlled by microwave signals. We show that the scheme can be used to generate photons with a time-reversal symmetric shape and in some instances may be useful as a tool for cooling the system towards its ground state. Furthermore, we present an experiment performed as an extension of the photon shaping work, aimed at reabsorption of the shaped photons. Here we establish the exchange of a single energy quantum with an efficiency of approximately 40% which is limited mainly by dephasing processes in the used qubits.

Finally, to extend the quantum photonics toolbox at our disposal, we developed a switching device capable of routing microwave signals on a superconducting chip. The presented device is essentially free of dissipation, has a sufficiently large bandwidth and high linearity for most circuit QED applications, and can be toggled on a very fast time-scale of several nanoseconds.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation stelle ich die wichtigsten Ergebnisse meiner Forschungsarbeit in der Quantum Device Gruppe vor, welche sich hauptsächlich mit der Erzeugung und Manipulation von Mikrowellenphotonen in supraleitenden Schaltkreisen und deren Verwendung in der Quanteninformationsverarbeitung beschäftigt. Photonen, ob in einer Resonanzkavität, oder in einem Wellenleiter, können zur Übertragung von Wechselwirkung und als Träger von Quanteninformation zwischen räumlich getrennten Qubitbits verwendet werden.

Das erste experimentelle Kapitel dieser Arbeit beschreibt ein Grundlagenexperiment, in dem wir die zyklische Evolution einer einzelnen Mode eines 3D Resonators benutzen, um ein Zwei-Qubit-Gatter zu verwirklichen. Diese Art Quantengatter kann einfach zu mehr als zwei Qubits verallgemeinert werden. In unserem Fall war der Prozess durch die Kohärenzeigenschaften der verwendeten Probe begrenzt. Daher halten wir es nicht für geeignet, andere gut etablierte Implementierungen von Multi-Qubit-Gattern zu ersetzen.

Die nachfolgenden Kapiteln stellen Experimente zur Erzeugung von einzelnen Mikrowellenphotonen mit einer kontrollierbaren Wellenform und die Möglichkeit ihrer effizienten Reabsorption von einem Quantensystem vor. Wir demonstrieren einen vollständig von Mikrowellensignalen gesteuerten Prozess zur Modulierung des Photons, im Gegensatz zu anderen kürzlich realisierten Protokollen, die schnelle Ansteuerung magnetischen Flusses in der Probe erfordern. Wir zeigen, dass das System verwendet werden kann um Photonen mit einer zeitumkehrinvarianten Form zu erzeugen. In einigen Fällen, kann dies für die Kühlung des Systems in seinen Grundzustand nützlich sein. Ferner stellen wir ein Experiment als Erweiterung des Photonmodulierung vor, welches auf die Reabsorption der Photonen abzielt. Hier realisieren wir den Austausch eines einzigen Energiequants mit einem Wirkungsgrad von etwa 40 %. Dieser ist hauptsächlich durch Dephasierungsprozesse in den verwendeten Qubits begrenzt.

Schließlich, um die Palette uns zur Verfügung stehender Quanten-Photonik-Techniken zu erweitern, haben wir eine Schaltvorrichtung entwickelt, die Mikrowellensignale auf einem supraleitenden Chip steuern kann. Die dargestellte Vorrichtung ist im wesentlichen frei von Verlusten, weist eine ausreichend große Bandbreite und ausreichend hohe Linearität für die meisten Circuit-QED-Anwendungen auf, und kann auf einer sehr schnellen Zeitskala von wenigen Nanosekunden umgeschaltet werden.