

Diss. ETH No. 19174

Control and readout of a superconducting artificial atom

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

ROMEO ALESSANDRO BIANCHETTI

Master of science ETH
born October 26, 1982
citizen of Locarno, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Wallraff, examiner
Prof. Dr. A. Ustinov, co-examiner

2010

Abstract

Quantum mechanics is an overwhelmingly successful theory, nevertheless nearly all of its applications do not demonstrate explicitly its most striking features. Even seminal devices such as lasers and transistors only imply quantum mechanics in a statistical sense, while all macroscopic observables can be described by classical theories. The realization of a true quantum machine could address problems which are intractable with any classical device such as the simulation of complex quantum systems or the efficient factorization of big numbers to cite only two examples.

Cavity quantum electrodynamics (CQED) features all unique characteristics of quantum mechanics, studying the strong interaction of single photons and atoms. The implementation of artificial superconducting atoms in high quality transmission line cavities realizes such a CQED setup in a solid state environment. This opens the field of quantum optics to embedded devices. Furthermore, the relatively simple fabrication of these devices makes them a promising candidate for the realization of a quantum information processor. In this architecture, macroscopic quantum circuits act as effective two- and three-level systems (qubits and qutrits) by employing the large non-linearity of a Josephson junction. They strongly couple to single photons in a one-dimensional superconducting cavity which inhibits radiative decay for the contained fragile states and at the same time acts as a readout device.

During this thesis a new laboratory for circuit cavity quantum electrodynamics experiments at cryogenic temperatures and high frequencies is set up at ETH Zurich. Devices fabricated at ETH are measured, demonstrating the classical signatures of CQED operated resonantly such as vacuum Rabi mode splitting, and dispersive effects such as AC-Stark and Lamb shifts.

The precise characterization of the relevant parameters of two- and three-level artificial atoms, combined with an accurate model of coherent and dissipative dynamics of the externally driven system show excellent quantitative agreement between data and theory. On this basis high fidelity measurements

of the qutrit populations by monitoring the field transmitted through the cavity are demonstrated. Arbitrary coherent superposition states to up to three levels are prepared with high quality using optimal control techniques. They are characterized for the first time outside the field of photon optics by a tomographic method. Full three-level quantum state tomography enables to test simplified qubit algorithms or generalized Bell-inequalities and can be extended to several coupled systems.

Finally the qubit-induced nonlinear cavity response is analyzed in the dispersive regime and used as a measurement device. In the high-power, nonlinear regime high fidelity single-shot qubit read-out can readily be implemented without the need of additional devices.

Zusammenfassung

Trotz der überwältigenden Erfolge der Quantenmechanik, zeigt fast keine Anwendung ihre bemerkenswertesten Eigenschaften. Selbst wegweisende Technologien wie Laser oder Transistoren setzen die Quantenmechanik nur im statistischen Sinne ein, während alle makroskopischen Observablen mit klassischen Theorien beschrieben werden können. Die Realisierung einer echten Quantenmaschine könnte sich mit Problemen befassen die für klassische Computer schwer zu bewältigen sind, wie zum Beispiel die Simulation von komplexen Quantensystemen oder die effiziente Primfaktorzerlegung grosser Zahlen.

Hohlraumquantenelektrodynamik (CQED) untersucht die starke Wechselwirkung zwischen einzelnen Photonen und Atomen und weist alle frappierende Eigenschaften der Quantenmechanik auf. Mittels künstlicher Atome in Mikrowellenresonatoren hoher Güte, kann die Hohlraumquantenelektrodynamik in einem Festkörper realisiert werden. Diese Konstruktion eröffnet einem das Feld der Quantenoptik in integrierten Schaltungen. Ausserdem stellt sie wegen der relativ einfachen Herstellung solcher Bauelemente einen vielversprechenden Anwärter für die Implementierung eines Quanteninformationsprozessors dar. In dieser Architektur fungieren makroskopische Quantenschaltungen als effektive Zwei- und Dreiniveausysteme (Qubits und Qutrits) indem sie die grosse Nichtlinearität von Josephson-Kontakten ausnutzen und stark zu einzelnen Photonen in einem supraleitenden quasi eindimensionalen Hohlraumresonator koppeln. Dieser unterbindet strahlungsbedingte Zerfälle von den fragilen Zuständen und dient gleichzeitig als Messinstrument.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsarbeit wurde an der ETH Zürich ein neues Tieftemperatur- und Hochfrequenzlabor aufgebaut um Experimente im Feld der Hohlraumquantenelektrodynamik durchzuführen. An der ETH hergestellte Proben wurden charakterisiert und klassische Signaturen der resonanten CQED, wie die Vakuum-Rabi-Modenaufspaltung, und dispersive Effekte, wie die Lamb- und Starkverschiebung, nachgewiesen.

Die gemessenen Daten sind in exzellenter quantitativer Übereinstimmung mit einem Modell für das getriebene System, das kohärente und dissipative Dynamik einbezieht. Die Population des Qutrits wird dabei durch der Beobachtung des Feldes, das durch den Resonator transmittiert wird rekonstruiert. Beliebige kohärente Überlagerungen von bis zu drei Zuständen konnten dank der Methoden der optimalen Steuerung mit hoher Güte präpariert werden. Diese wurden erstmals ausserhalb des Feldes der Photonik mit einer tomographischen Methode charakterisiert. Volle Dreiniveauquantenzustandstomographie ermöglicht das Testen vereinfachter Qubitalgorithmen oder verallgemeinerter Bell-Ungleichungen und kann auf mehrere gekoppelte Systeme erweitert werden.

Schliesslich ist die Qubit-induzierte nichtlineare Resonatorantwort im dispersivem Regime analysiert und als Messvorrichtung benutzt worden. Im Bereich weit oberhalb der kritischen Leistung kann der Qubitzustand mit hoher Genauigkeit durch eine einzelne Messung ausgelesen werden.