


Tip-enhanced atomic memristor – energy-efficient circuits and photon emission

Doctoral Thesis**Author(s):**

Cheng, Bojun 

Publication date:

2021

Permanent link:

<https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000505165>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

ETH Zürich Series in Electromagnetic Fields 19

DISS. ETH NO. 27461

TIP-ENHANCED ATOMIC MEMRISTOR
— *ENERGY-EFFICIENT CIRCUITS AND PHOTON EMISSION*

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

presented by
BOJUN CHENG
M.Sc. EEIT, ETH Zurich
born on 16.02.1990
citizen of China

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Juerg Leuthold, examiner
Prof. Dr. Giacomo Indiveri, co-examiner
Dr. Alexandros Emboras, co-examiner

2021

Abstract

Following the prediction of Moore, the transistors' density grew exponentially with ever-shrinking dimensions. Downscaling electrical components have been a research topic for several decades. Increasingly, it is becoming more challenging to improve conventional transistors' speed, density, and power consumption.

Atomic switch, or atomic memristor, is envisioned to overcome the scaling challenges. Atomic switch is a nanoionic device that the switching on/off operation, i.e., operation to form/annihilate a conductive path, only relies on the movement of a few atoms. Since metal atoms can provide a highly conductive channel even if their cluster size is in the nanometer scale, atomic switches may enable downscaling to a few nm.

To explore the atomic switch's potential, the work is conducted in three different aspects. First, a new nanotechnology fabrication platform capable of reaching field confinement at nanoscale is developed. It is shown how field confinement improves atomic switches' performance. Next, the excellent performance is exploited to build a hybrid circuit integrated with the atomic switches. Thanks to the atomic switches, the energy efficiency is doubled compared to the state-of-the-art conventional transistor circuits. Last, a new function for an atomic switch is realized — as a photon source. The straightforward fabrication process makes it feasible to be integrated on-chip as the smallest on-chip photon source.

In the course of this thesis, the following outstanding results have been achieved:

- First, a compact Atomic switch with inter-electrode distances is fabricated down to 1 nm. It features excellent electrical performance and reproducible characteristics, thanks to the atomic switch's field confinement. Set voltages around 100 mV, ultra-fast switching times of 7.5 ns, and write energies of 18 fJ has been achieved. Furthermore, excellent cell-to-cell uniformity and a resistance extinction ratio as high as $6 \cdot 10^5$ are demonstrated in the atomic switches, making them ideal candidates as next-generation memory components and beyond.
- Second, ultra-low leakage logic circuits combining field-confined atomic switches with transistors are demonstrated. Experiments and simulations find significant leakage current reductions of up to 99 %. Likewise, circuit simulations of memristive hybrid ring

oscillators, NAND, or full adders show more than 100 % gain in energy efficiency per cycle over state-of-the-art circuits. More importantly, the hybrid circuits offer hysteresis-free operation due to properly engineered properties. For one thing, the threshold voltage of the atomic switch is designed to match the circuit; for the other, the filament features a self-adaptive diameter and thus self-adaptive on-state resistance to match the current of the transistor during operation.

- Third, photon emissions from the atomic switch are demonstrated. This is the first reported direct emission of photons upon memristive switching. The atomic switch consists of an Ag/ α -SiO_x/Pt junction. The emission efficiency is optimized with a plasmonic nanoantenna. After the electroluminescence and photoluminescence demonstration, the emission mechanism is investigated. Our investigations suggest that the emission stems from electroluminescent defects generated during resistive switching and atomic rearrangement of the conductive filament. It is further concluded that emission is likely to originate from the defects — oxygen vacancy clusters — associated with the resistive switching process. The device features a tiny footprint, and the fabrication process is straightforward and scalable. Thanks to the light-emitting atomic switch's compact size and simple structure, it could be used as the smallest on-chip photon source and exploited in optical memristive neural networks to identify weight changes from the corresponding memristor.

Zusammenfassung

Nach der Vorhersage von Moore wächst die Dichte der Transistoren exponentiell mit immer kleiner werdenden Dimensionen. Das Skalieren elektrischer Komponenten ist seit mehreren Jahrzehnten ein Forschungsthema. Es wird jedoch immer schwieriger, die Geschwindigkeit, Dichte und den Stromverbrauch herkömmlicher Transistoren zu verbessern.

Der atomare Schalter oder atomare Memristor soll diese Skalierungsherausforderungen überwinden. Dieser Schalter ist ein nanoionisches Element, bei welchem der Ein- / Ausschaltvorgang, d.h. die Bildung / Vernichtung eines leitfähigen Pfades, nur auf der Bewegung einiger Atome beruht. Metallatome eignen sich speziell für diesen Pfad, da sie eine hohe Leitfähigkeit aufweisen selbst bei nur Nanometer grossen Ansammlungen. Aufgrund dieser Eigenschaft könnten atomare Schalter die Verkleinerung der Dimensionen in die Nanometer Region möglich machen.

Um den atomaren Schalter zu erforschen, wurde diese Arbeit in drei Kapitel unterteilt. Erstens wurde eine neue Nanotechnologie-Fertigungsplattform entwickelt, die in der Lage ist, das elektrische Feld auf ein paar Nanometer zu begrenzen. Tatsächlich verbesserte dieser Ansatz das Verhalten des atomaren Schalters. Zweitens, aufgrund dieser Verbesserung war es möglich eine Hybridschaltung mit dem atomaren Schalter zu bauen. Dank des atomaren Schalters verdoppelte sich die Energieeffizienz im Vergleich zur hochmodernen konventionellen Transistorschaltung. Drittens wurde eine neue Funktion für einen Atomschalter realisiert — als Photonenquelle. Der einfache Herstellungsprozess macht eine direkte Integration auf einem Chip möglich was in der kleinsten auf-Chip-Photonenquelle resultieren würde.

Im Zuge dieser Arbeit wurden folgende herausragende Ergebnisse erzielt:

- Erstens wurde ein kompakter atomarer Schalter mit Elektrodenabständen bis zu 1 nm hergestellt. Er zeichnet sich durch hervorragende elektrisches Verhalten und reproduzierbare Eigenschaften aus, aufgrund der Begrenzung des Feldes. Es wurden Einschaltspannung von 100 mV, ultraschnelle Schaltzeiten von 7,5 ns und Schreibenergien von 18 fJ erreicht. Darüber hinaus wird ausgezeichnete Bauteil Gleichmässigkeit und ein Widerstandsverhältnis von bis zu $6 \cdot 10^5$ mit den atomaren Schaltern demonstriert. All diese Faktoren machen den Schalter zu

einem idealen Kandidaten für Speicherkomponenten der nächsten Generation.

- Zweitens wurden Logikschaltungen mit extrem geringem Ableitstrom demonstriert, die feldbegrenzte atomare Schalter mit Transistoren kombinieren. Experimente und Simulationen finden signifikante Ableitstromreduzierungen von bis zu 99 %. Ebenso zeigen Schaltungssimulationen von memristiven Hybrid-Ringoszillatoren, NAND oder Volladdieren eine Energieeffizienzsteigerung von mehr als 100 % pro Zyklus im Vergleich mit modernsten Schaltungen. Zusätzlich ist die Hybridschaltung frei von Hysterese aufgrund der Netzwerkarchitektur. Zum einen ist die Schaltspannung des atomaren Schalters auf das Netzwerk angepasst. Zum anderen ist der Durchmesser des leitenden Filaments und damit der Widerstand selbstregulierend und ist somit an den Strom des Transistors angepasst.
- Drittens wurden Photonen demonstriert, die vom Atomschalter emittiert werden. Dies ist der erste Bericht direkter Emission von Photonen beim Schalten eines Memristors. Der Atomschalter besteht aus einem Ag/ α -SiO₂/Pt-Übergang. Die Emissionseffizienz wird mit einer plasmonischen Nanoantenne optimiert. Nach der Elektrolumineszenz und Photolumineszenz Messung wird der Emissionsmechanismus untersucht. Unsere Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Emission von elektrolumineszenten Defekten stammt. Diese Defekte entstehen durch die atomare Neuordnung des leitenden Pfades während des Schaltprozesses. Es wird der Schluss gezogen, dass die Emission am wahrscheinlichsten von den Defekten — Sauerstoff-Leerstellen Ansammlungen — stammt, die Schaltprozess zusammenhängen. Dank der kompakten Größe und des einfachen Aufbaus des lichtemittierenden atomaren Schalters könnte er als kleinste Auf-Chip-Photonenquelle verwendet werden. Zusätzlich ist eine Anwendung in optischen memristiven neural Netzwerken zur identifizierung von Gewichtsänderungen möglich.