



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Fizică
ȘCOALA DOCTORALĂ DE FIZICĂ



Andrei-Emanuel DRAGOMIR

SIMULARE ȘI OPTIMIZARE DE DISPOZITIVE
CUANTICE FOTONICE

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Coordonator științific

Dr. Aurelian ISAR

București, 2024

Cuprins

1	Introducere	2
1.1	Scop	3
1.2	Motivație	3
2	Aspecte teoretice ale informației cuantice	4
3	Algoritmul de generare a dispozitivelor	7
4	Exemple și rezultate ale algoritmului de optimizare	11
5	Concluzii generale	14

Capitolul 1

Introducere

Descoperirea mecanicii cuantice a adus cu sine o schimbare majoră de paradigmă în înțelegerea universului. Concepte cuantice precum dualitatea particulă-undă au condus la dezvoltarea unor tehnologii remarcabile precum laserul, tranzistorul, rezonanța magnetică nucleară, și microscopia electronică. O dată cu aceste tehnologii, o ramură nouă a teoriei informației este dezvoltată: informația cuantică. În această paradigmă, efectele cuantice sunt folosite pentru a procesa informația în moduri inedite cu potențialul de a îmbunătăți puterea de calcul a dispozitivelor actuale.

Una din cele mai râvnite resurse în domeniul informației cuantice este 'quantum advantage', o situație în care un calculator cuantic găsește soluția la o problemă specifică mai repede sau mai eficient decât un calculator clasic. Acest scenariu este o motivație foarte puternică pentru dezvoltarea unui 'calculator cuantic universal', un dispozitiv care poate executa orice algoritm cuantic. Implicațiile creării unui astfel de dispozitiv nu pot fi supraestimate. Aplicațiile în domenii precum medicina, materiale și securitate națională sunt evidente, dar potențialul tehnologiilor cuantice nu poate fi măsurat în prezent.

1.1 Scop

Teza are doua scopuri majore. În primul rând este prezentat contextul științific actual în domeniul tehnologiilor informației cuantice. Sunt tratate diverse concepte elementare de mecanică cuantică aplicate în teoria informației care conduc la introducerea elementelor de bază a teoriei informației cuantice. Sunt prezentate implementări actuale ale circuitelor cuantice cu accentul pus pe fonică cuantică integrată.

Al doilea scop al tezei este de a prezenta o contribuție originală, o metodă inedită de a genera structuri de siliciu care acționează ca porți cuantice elementare pentru circuite cuantice de fonică cuantică integrată. Teza prezintă în primă instanță metoda folosită pentru generarea acestor porți cuantice și apoi o analiză cuprinzătoare a circuitelor generate.

1.2 Motivație

Până acum, cercetarea în domeniul computingului cuantic folosind optică integrată s-a îndreptat înspre aranjamente de circuite programabile, asemănătoare cu microcipurile tradiționale. În această teza sugerez o abordare diferită. În loc de a folosi un microcip complex și programabil pentru a aplica o poartă cuantică, sugerez folosirea unui singur microcip simplu care poate aplica o singură poartă, deci neprogramabil, dar mai rapid și folosind mai puține resurse.

Pentru aceasta este nevoie de o metodă de a crea dispozitive cuantice care aplică o transformare unitară specifică, ceea ce am și făcut.

Capitolul 2

Aspecte teoretice ale informației cuantice

În primul capitol al tezei sunt introduse elementele teoretice necesare înțelegerii teoriei informației cuantice și a contextului științific actual.

Secțiunea 1.1 prezintă aplicațiile existente și potențiale ale tehnologiilor cuantice: simulare cuantică, detectori cuantici și comunicare cuantică.

Secțiunea 1.2 introduce conceptele elementare de mecanică cuantică necesare înțelegerii restului tezei. Pornesc de la concepte matematice cât mai simple posibil, spații vectoriale și produse scalare, și explic progresiv principiile mecanicii cuantice în paradigma specifică a informației cuantice. Elementul principal în jurul căruia orbitează întregul domeniu este qubitul, o combinație lineară de două stări cuantice:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle. \quad (2.1)$$

El descrie o stare aflată într-o superpoziție între cele două baze $|0\rangle$ și $|1\rangle$.

În aceeași secțiune descriu evoluția qubitului, care este dată de transformări unitare, cunoscute ca și operatori.

$$A = \sum_{i,j=1}^N a_{ij} |i\rangle \langle j|, \quad (2.2)$$

unde $|i\rangle \langle j|$ sunt matrici de dimensiunea $N \times N$ cu toate elementele 0 în afara de elementul (i, j) care este 1.

Folosind aceste elemente, introduc descrierea circuitelor cuantice ca succesiune de porți cuantice. Folosind aceste circuite prezint exemple de algoritmi cuantici care nu pot fi simulați folosind computing clasic. Întroduc, de asemenea, criteriile necesare pentru ca o implementare de calculare cuantică să fie considerată universală.

În finalul secțiunii descriu qudiții, echivalentul qubiților, dar cu mai multe baze posibile. Stările cuantice pot avea orice număr de niveluri, deci spre deosebire de qubit care are două stări posibile ($|0\rangle$ și $|1\rangle$), un qudit poate avea oricât de multe nivele.

În secțiunea 1.3 sunt prezentate două metode tomografice: solo-qubit și SIC-POVM. Tomografia reprezintă determinarea stării unui sistem cuantic. Determinarea stării unui sistem cuantic este esențială. Este necesară pentru a verifica dacă stările cuantice sunt corecte după generare, dacă o anumită poartă cuantică funcționează conform corect sau dacă un canal cuantic se comportă corespunzător etc. Stările cuantice nu pot fi clonate, iar măsurarea lor colapsează funcția de undă într-o stare specifică, care este incompletă în descrierea stării originale. Tomografia se bazează pe principiul general că doi qubiți descriși de aceeași matrice de densitate se vor comporta identic sub influența aceluiași mediu. Prin urmare, pentru a determina o stare cuantică, se pot pregăti mai multe stări identice și măsurate fiecare dintre ele independent. Deși fiecare dintre măsurători va oferi un singur rezultat, frecvențele acelor rezultate pot fi utilizate pentru a deduce probabilitățile măsurării acelei stări. Folosind aceste probabilități se poate determina o matrice de densitate a stării inițiale.

Prima metodă descrisă în această secțiune este o metodă prezentată cu

caracter didactic, pentru înțelegerea principiilor tomografice. A doua metodă este prezentată pentru a fi utilizată ulterior.

Secțiunea 1.4 prezintă o scurtă descriere a implementărilor calculatoarelor cuantice actuale. Ordinea implementărilor este istorică, începând cu cele mai vechi și nefezabile implementări și finalizând cu implementări folosite actual care au cel mai mare potențial.

O atenție deosebită este dată implementării fotonice integrate, întreaga secțiune 1.5. Dispozitivele generate de algoritmul prezentat ulterior folosesc această implementare. Este prezentată tranziția de la dispozitive optice macroscopice la dispozitive optice integrate în cipuri. Sunt prezentate cele două metode majore de a encoda qubiți folosind fotoni: drumul optic și polarizare.

Capitolul 3

Algoritmul de generare a dispozitivelor

În cel de-al doilea capitol al tezei sunt prezentate elemente practice legate de generarea structurilor de siliciu.

În secțiunea 2.1 este prezentat conceptul general și raționamentul din spațiile alegerii metodei de optimizare folosite. Toate metodele investigate au ca scop generarea unei structuri de cip optic. Acest cip este alcătuit din pătrate de siliciu, numite „pixeli” de acum înainte. Acești pixeli pot fi fie „porniți” - umpluți cu silicon sau „off” - umpluți cu aer. Toată această grilă de pixeli de siliciu/aer acționează ca poarta cuantică pentru propagarea fotonilor. Ghidurile de undă din siliciu sunt adăugate pe ambele părți ale structurii pentru a avea o modalitate de introducere și extragere a fotonilor din cip. Structura finală ar trebui să arate ca cea din figura 3.1. În continuarea capitolului sunt prezentate mai multe metode de optimizare încercate, cu grade diferite de succes.

Metoda cea mai bună de optimizare găsită, și cea folosită în restul tezei am numit-o split-and-fit. Algoritmul încearcă să găsească cea mai bună combinație de pixeli pentru o structură cu pixeli foarte mari. Când ajunge la o structură satisfăcătoare, adică nu mai poate găsi o structură mai bună



Figura 3.1: Exemplu de structură a unui cip.

modificând nici unul dintre pixeli individual, împarte fiecare pixel în patru de același tip. Această nouă structură este optimizată și ea prin aceeași metodă până când nu mai poate fi îmbunătățită. În teorie, acest algoritm poate optimiza la infinit, deoarece, în timpul simulării, pixelii pot fi oricât de mici este necesar. În realitate, există o limită a dimensiunii minime a unui pixel dată de nivelul tehnologic actual.

Pentru că generarea porților cuantice elementare necesită optimizare iterativă, este necesară o metodă de a simula propagarea undelor electromagnetice. În secțiunea 2.2 este introdus și explicat algoritmul de Finite-Difference

Time-Domain, sau FDTD, care rezolvă iterativ ecuațiile lui Maxwell pentru a propaga unde electromagnetice. O descriere completă a acestei metode este prezentată în anexa A. Acest algoritm separă spațiul de simulare în puncte discrete de câmp electric și câmp magnetic și apoi calculează punct cu punct valoarea celor două câmpuri în fiecare punct funcție de valoarea la momentul de timp anterior și valoarea câmpurilor adiacente.

Pentru asigurarea unui rezultat acceptabil este nevoie de o metodă de verificare a asemănării dintre câmpurile electromagnetice generate de dispozitiv și câmpurile electromagnetice dorite, cele rezultate din aplicarea teoretică a porților cuantice dorite. În secțiunea 2.3 este prezentată metoda de calcul a fidelității undelor generate. Deoarece câmpul de FDTD este discret, calculul fidelității se face comparând fiecare componentă (E^z, B^x, B^y) a câmpului actual (a) și câmpului dorit (d) în toate punctele simulării.

$$F = \frac{|E_a^z \times E_d^z + B_a^x \times B_d^x + B_a^y \times B_d^y|^2}{(E_a^z \times E_a^z + B_a^x \times B_a^x + B_a^y \times B_a^y)(E_d^z \times E_d^z + B_d^x \times B_d^x + B_d^y \times B_d^y)}. \quad (3.1)$$

Secțiunea 2.4 tratează metodele folosite de a face tranziția algoritmului din două dimensiuni în trei. Sunt prezentate metode folosite fără succes precum și unele care par promițătoare. În realitate, algoritmul este foarte ușor de scalat teoretic. Problema este că FDTD 3D este mult mai intensiv computațional decât 2D, deci trebuie fie găsite soluții alternative de propagare, fie mult mai multă putere de calcul.

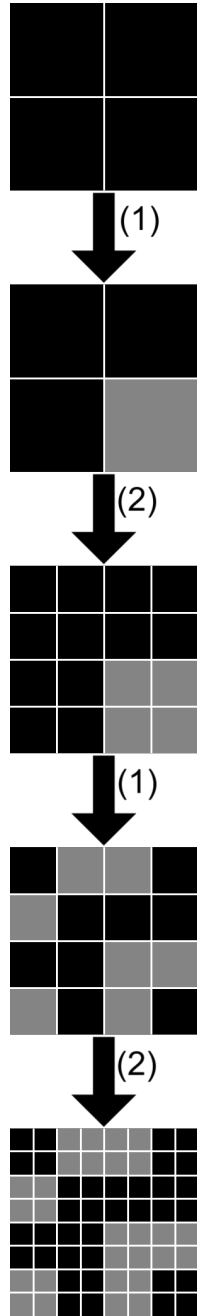


Figura 3.2: Cipul de silicon este iterativ optimizat (1) și împărțit (2).

Capitolul 4

Exemple și rezultate ale algoritmului de optimizare

Capitolul trei prezintă diverse exemple de porți cuantice elementare generate folosind algoritmul descris în teză.

Porțile Pauli-X și Hadamard sunt prezentate pentru a demonstra capabilitățile algoritmului de a genera o poartă elementară pentru un singur qubit. Aceste porți, împreună cu porțile generate aleator din secțiunea 3.6 demonstrează că algoritmul funcționează consistent pentru orice transformare unitară.

Fiecare imagine prezentată este o suprapunere de trei imagini diferite: momentul generării undei electromagnetice, înainte de a intra în dispozitiv, un moment când unda este în interiorul cipului și un moment final în care unda iese din dispozitiv. Qubitul este encodat spațial, ghidul de undă superior reprezentând starea $|0\rangle$, iar ghidul de undă inferior starea $|1\rangle$.

Secțiunile 3.3 și 3.4 prezintă capabilitățile algoritmului de a genera o poartă cuantică elementară pentru quidiți. Aplicabilitatea practică a acestui fapt este exemplificat în secțiunea 3.5 unde sunt prezentate rezultatele simulării unor porți cuantice care pot fi folosite pentru SIC-POVM. Structurile generate sunt mai compacte și mai eficiente decât alte metode existente.

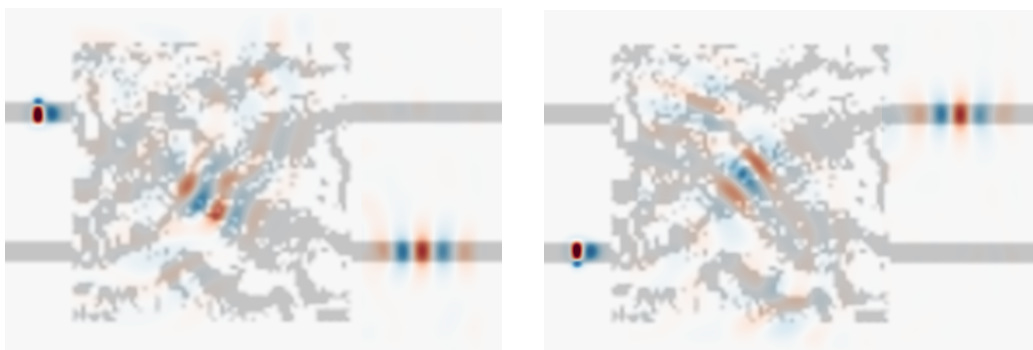


Figura 4.1: Exemplu: Structura care generează Pauli-X. Se observă cum un qubit în starea $|0\rangle$ (lumină doar în ghidul de undă de sus) trece în starea $|1\rangle$ (lumină doar în ghidul de undă de jos).

Este demonstrat faptul că pentru o poartă elementară de qubit, fidelitatea este în jur de 0.87, pe când pentru qudiți scade cu numărul de stări.

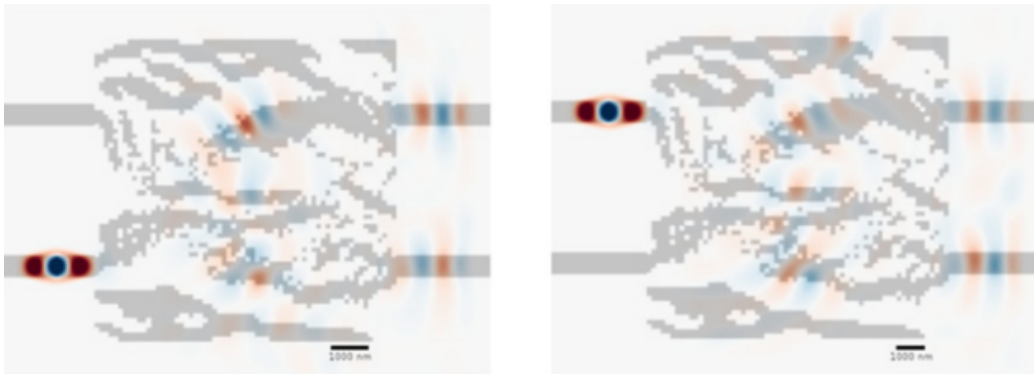


Figura 4.2: Exemplu: Structura care generează poarta Hadamard.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Undele care ies din dispozitiv sunt fie în fază, fie în antifază funcție de starea inițială a câmpului.

Capitolul 5

Concluzii generale

Această teză face o prezentare generală a conceptelor de bază în domeniul computingului cuantic. Am identificat neajunsurile și provocări în abordările actuale și am propus o metodă de proiectare a porților cuantice care rezolvă aceste probleme.

Prin analiză teoretică riguroasă și simulări, am demonstrat eficacitatea și versatilitatea metodei propuse. Rezultatele arată nu doar capacitatea algoritmului de a genera un set divers de porți cuantice, ci subliniază și potențialul acestuia pentru scalabilitate și integrare în structuri de calcul mai mari.

Implicațiile acestei cercetări se extind dincolo de domeniul imediat al generării porților cuantice elementare. Această metodă pune o bază pentru explorarea de noi căi prin care se pot construi porți cuantice fotonice care pot revoluționa modul în care gândim circuitele cuantice. Capacitatea sa inerentă de a fi personalizată pentru orice transformare este o abordare nouă și practică pentru a ușura scalabilitatea circuitelor cuantice.