

(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2023 00321**

(22) Data de depozit: **22/06/2023**

(41) Data publicării cererii:
30/04/2024 BOPi nr. **4/2024**

(71) Solicitant:
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE
DEZVOLTARE PENTRU TEHNOLOGII
IZOTOPICE ȘI MOLECULARE INCDTIM,
STR.DONAT, NR.67-103, POB 700,
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO**

(72) Inventatori:

• **MORARI IOAN CRISTIAN,
STR. CONSTANTIN BRÂNCUȘI NR. 31,
AP. 4, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;**
• **TUDORAN CRISTIAN DANIEL, STR.
ARON DENSUȘIANU NR. 16, AP. 1,
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;**
• **TURCU ROMULUS VALERIU FLAVIU,
STR.NICOLAE TITULESCU, NR.38, BL.P18,
ET.4, AP.21, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO**

(54) CIRCUIT DISCRIMINATOR ȘI ALGORITM PENTRU DETECȚIA COINCIDENȚEI FOTONILOR SINGULARI

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un circuit discriminator și la un algoritm pentru detecția coincidenței fotonilor singulari, cu aplicabilitate în cadrul sistemelor de comunicații cuantice. Circuitul conform invenției este alcătuit dintr-un microcontroler compatibil Arduino, două mufe de tip BNC pentru intrarea semnalelor de la două detectoare de fotoni, șase conectoare JACK pentru comenzi către periferice și patru leduri indicatoare ale stărilor de funcționare a circuitului. Algoritmul conform invenției efectuează detecția coincidenței impulsurilor primite la pinii de intrare, numeric, detectând trecerea pinilor de intrare din 0 logic spre 1 logic pe frontul crescător al impulsului, urmată de detectarea trecerii pinilor de intrare din 1 logic spre 0 logic pe frontul descrescător al impulsului măsurat.

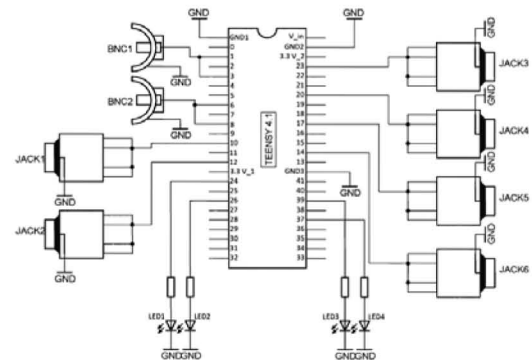


Fig. 2

Revendicări: 2
Figuri: 6

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI
Cerere de brevet de invenție
Nr. <u>a 2023 de 321</u>
Data depozit <u>22-06-2023</u>

Titlu

**CIRCUIT DISCRIMINATOR ȘI ALGORITM PENTRU DETECȚIA
COINCIDENȚEI FOTONILOR SINGULARI**

Autori : Cristian Morari, Cristian Tudoran, Romulus Valeriu Flaviu Turcu

Precizarea domeniului tehnic in care poate fi folosita inventia;

Invenția se referă la un circuit utilizat în domeniul emergent al comunicațiilor cuantice.

Concret, invenția se referă la un circuit utilizat pentru detecția sincronă a fotonilor singulari, cu aplicabilitate imediată în cadrul sistemelor de criptare cuantică pentru comunicații.

Scopul principal al dezvoltării circuitului și algoritmului descris de prezenta invenție este oferirea unei soluții concrete și accesibile pentru implementarea facilă a metodei de criptare cu cheie cuantică (QKD). În momentul actual, dezvoltarea unui sistem real de comunicații cuantice reprezintă o problemă foarte costisitoare și anevoioasă din cauza accesului dificil la o serie de echipamente care fac parte din lanțul de comunicație: este vorba aici în special de detectoarele de fotoni singulari respectiv de circuitistica aferentă pentru discriminarea și numărarea fotonilor și detecția celor entanglați. Fiind vorba de un domeniu emergent, nu există încă pe piață nici o soluție software standardizată, cu ajutorul căreia să se poată realiza ușor numărarea fotonilor și implicit interpretarea informației cuantice purtată de aceștia, utilizând aparatura de detecție existentă.

Pentru realizarea funcției de detectare și numărare a fotonilor singulari, prezenta invenție utilizează exclusiv componente electronice ușor de procurat, în combinație cu aplicarea unui algoritm numeric pentru detectarea eficientă și numărarea acestora.

Indicarea stadiului anterior al tehnicii si indicarea documentelor care stau la baza acestuia;

Obiectivul principal al criptografiei cuantice este transmiterea securizată a informației cu ajutorul particulelor cuantice, de ex. fotonii singulari.

Securitatea absolută a unei transmisii cuantice este asigurată de principiile mecanicii cuantice, iar în cazul fotonilor singulari, aceștia nu pot fi interceptați și măsurați cu certitudine (precizie) absolută. Fotonii singulari care se propagă într-un canal cuantic de comunicație, (de ex. printr-o fibră optică unimodală), sunt utilizați pentru a transmite numai cheia secretă pentru decriptarea mesajului, urmând ca mesajul în sine să fie trimis printr-un canal public de comunicație.

În momentul actual există pe piață echipamente comerciale de criptografie cuantică prin fibră optică [1]. Aceste echipamente de comunicații se utilizează în acele situații speciale în care securitatea absolută a informației transmise are o importanță mult mai mare decât viteza de transfer a datelor. Un foton singular este caracterizat de o serie de parametri: frecvența de oscilație a câmpului electromagnetic (sau invers, lungimea de undă), direcția de propagare (vectorul de undă), faza și polarizarea.

În criptografia cuantică cea mai utilizată metodă pentru codificarea informației este codarea digitală prin polarizarea fotonilor. Decodarea informației la receptor realizându-se în acest caz prin utilizarea unor detectoare cu filtre sensibile la polarizare, de ex. prisme de tip Glan sau Wollaston [2]. Conform legilor mecanicii cuantice, polarizarea fotonului poate fi determinată numai prin măsurători directe. O singură măsurătoare poate prezenta întotdeauna o eroare, pentru că starea de polarizare a unui foton se poate schimba într-un mod imprevizibil. Din acest motiv, în cadrul comunicației cuantice, validarea măsurătorii, deci implicit a corectitudinii, este obținută numai dacă polarizările la emisie și recepție coincid. În cazul în care polarizările nu coincid, avem o eroare la măsurare (incertitudine) de până la 50%.

Un exemplu este protocolul de comunicație numit BB84, în care emițătorul și receptorul utilizează un canal public și fac schimb de informații despre bazele de polarizare a datelor transmise și primite, însă nu se comunică rezultatul măsurătorii polarizării. Din mulțimea datelor trimise/recepționate, se rețin doar acei biți care au fost primiți în baze de polarizare identică - acest principiu purtând denumirea de "cheie cuantică variabilă".

Referindu-ne acum în mod specific la tehnica circuitelor de detectare / interpretare și numărare a fotonilor entanglați (detectoare de coincidență), literatura de specialitate prezintă o serie de circuite, care în mare sunt bazate pe principiul comparării impulsurilor provenite de la detectoarele de fotoni, cu o tensiune de prag. Aproape toate circuitele descrise utilizează metode fizice de formare și amplificare a semnalului până la un prag la care se pot utiliza porți logice pentru comparare și detectare a coincidenței.

Spre exemplu, brevetul (US 10024979B1) descrie un circuit de detecție a coincidenței ce conține un etaj primar de integrare a impulsurilor printr-un etaj RC, urmat de un circuit de amplificare și formare a semnalului care generează un semnal de poartă (pentru comandă) pentru un convertor analog-digital, care furnizează la ieșirea sa o valoare numerică numai în condițiile detecției în coincidență a fotonilor.

Brevetul (US 2018/0224564) descrie un circuit numărător de fotoni în coincidență, ce conține un lanț de detecție / numărare format din: amplificator, formator de semnal (amplificator integrator), linie de întârziere, comparator și un convertor ADC.

În brevetul (US 4071761) se descrie un circuit similar, care, pe lângă etajul primar de amplificare conține un circuit de comparare a amplitudinii impulsurilor detectate, iar detectarea coincidenței se realizează simplu prin utilizarea unor clasice porți logice "ȘI".

Printre metodele pur fizice de detectare a coincidenței, menționăm aici brevetul (US 4469942) în care se utilizează principiul fizic al interacțiunii dintre electroni și atomi: un fascicul de electroni (proveniți de la fotomultiplicator) accelerați pe o direcție perpendiculară pe un grup de atomi, este împrăștiat în urma interacțiunii cu atomii, iar cu ajutorul unui filtru direcțional se separă electronii împrăștiați având o direcție și o energie cunoscută. În urma filtrării, electronii separați emit fotoni prin efect de frânare, iar fotonii obținuți pe direcția inițială a electronilor sunt numărați și folosiți pentru circuitul comparator (coincidență electron - foton).

Expunerea invenției în termeni care să permită înțelegerea problemei tehnice (chiar dacă problema tehnică nu este explicit menționată) și a soluției așa cum este revendicată precum și avantajele invenției în raport cu stadiul anterior al tehnicii;

Scopul principal al dezvoltării circuitului și algoritmului descris de prezenta invenție este oferirea unei soluții concrete și accesibile pentru implementarea facilă a metodei de detecție a fotonilor entanglați (coincidență fonică).

Problema tehnică pe care o rezolvă prezenta invenție este legată de prelucrarea numerică directă a semnalului sub formă de impuls provenit de la detectorul de fotoni - cu scopul numărării în coincidență a fotonilor singolari proveniți de pe linia de transmisie (fibra optică).

Pentru dezvoltarea pe scară largă a tehnicii de comunicație și criptare cuantică utilizând protocoalele standard [3], este nevoie de circuite electronice care să detecteze și să numere fotonii singolari cu rate mari de transfer (pentru obținerea unor viteze ridicate de comunicație).

În prezent, echipamentele performante disponibile pe piață oferă viteze de numărare în domeniul 10...100 Mcps (*mega impulsuri pe secundă*), având timpi de remanență de 10 μ s și frecvențe de lucru de până la 100 kHz. Cele mai multe sisteme uzuale de detecție cuantică oferă în acest moment frecvențe reale de măsurare mai mici de 10 kHz având timpi de integrare de ordinul a 100 μ s.

Din cauza lățimii foarte mici a impulsurilor furnizate la ieșirea detectoarelor de fotoni (având lățimi de ordinul nano-secundelor), aproape toate numărătoarele standard se bazează pe principiul numărării binare comandate de un semnal de poartă (trigger). Astfel, ieșirea numărătorului furnizează o valoare numerică (număr întreg) care corespunde proporțional cu numărul de fotoni detectați pentru un timp de integrare dat.

Utilizarea metodei digitale de numărare este avantajoasă din punctul de vedere al preciziei, precum și din perspectiva stocării și interfațării. Această tehnică de numărare se pretează cel mai bine la achiziția semnalelor slabe, cu timpi de integrare lungi, de ex. detectarea fotonilor la nivele mici de semnal luminos.

În schimb în cazul efectuării numărătorii de fotoni cu viteze mari, tehnica de numărare binară nu este de mare folos, pentru că în acest caz zgomotul Poisson (fluctuația numărului de fotoni detectați) devine predominant. Zgomotul Poisson **nu** se poate filtra din procesul de numărare pentru că acesta este un zgomot de natură optică. Din acest motiv, creșterea vitezei de numărare în cazul numărătoarelor digitale se obține sacrificând precizia de numărare a acestuia.

O altă tehnică de numărare a fotonilor este cea denumită ”numărare rezolvată în domeniul timp”, în cadrul căreia se efectuează numărarea fotonilor singulari dintr-un semnal luminos periodic combinată cu măsurarea momentelor de timp la care s-a produs detecția fiecărui foton individual. Semnalul de ieșire al detectorului este sub forma unui tren de impulsuri distribuite aleator, datorită detecției fotonilor singulari. Durata de timp (”perioada”) dintre două impulsuri consecutive este inegală în mare parte. În cazul detecției unui foton, se înregistrează și momentul de timp la care s-a produs detecția (se înscrie un ”I” într-o locație de memorie, la o adresă proporțională cu momentul de timp al detecției).

Și în cazul acestei metode de numărare, viteza de detecție este destul de limitată din cauza timpilor de întârziere introduși de lucrul cu memoria circuitului (scriere, acces prin magistrală).

În comparație cu variantele de circuite descrise mai sus și/sau în stadiul anterior al tehnicii, circuitul de detecție / numărare a coincidenței fotonilor singulari descris de prezenta invenție se remarcă printr-o simplificare remarcabilă a întregului circuit electronic de numărare, combinată cu utilizarea unui algoritm numeric robust pentru detecția simultană a fotonilor și/sau a coincidenței acestora.

Diferența radicală și implicit **noutatea** în metoda de detecție utilizată în circuitul descris de prezenta invenție este următoarea: pentru fiecare impuls primit de la detectorul de fotoni (impuls

cu lățimea de aprox. 10 ns și amplitudinea de aprox. 2V), circuitul verifică existența și sincronizarea frontului crescător și cel descrescător, pentru o tensiune de prag setată. Detectarea fronturilor crescător și descrescător se realizează la nivel numeric (software), prin utilizarea funcțiilor oferite de un microcontroller modern de mare viteză (Teensy 4.1, 1 GHz [4]).

Astfel, pentru a detecta doi fotoni singulari în coincidență, semnalul provenit de la două detectoare independente de fotoni, se conectează la 4 pini de intrare ai microcontroller-ului, grupați împreună doi câte doi. În urma rulării algoritmului, se verifică dacă pe cele două grupe de câte doi pini avem o trecere din zero logic cu front crescător spre 1 logic. După un anumit interval de timp (pauză de ordinul nano-secundelor) se verifică din nou pe ambele grupe de pini, existența unui front descrescător din 1 logic spre 0 logic (aceasta indicând trecerea din impuls spre zero). Dacă în ambele situații menționate mai sus obținem valori de adevăr (*true*), algoritmul marchează obținerea unei perechi singulare de fotoni în regim de coincidență, și de asemenea se incrementează cele două variabile contor care mențin numărul de fotoni detectați.

Rutina descrisă mai sus este executată pentru orice impuls produs de detecția unui foton (nu există timp de integrare, timp de acumulare, etc.).

Din acest motiv și din cauza simplificării radicale a întregului circuit de detecție și numărare, **performanțele tehnice ale circuitului propus de prezenta invenție sunt similare oricărui sistem de numărare (a fotonilor singulari) existent momentan pe piață, în timp ce costul său este mult redus comparativ cu media.**

Prezentarea pe scurt a desenelor explicative

Figura 1 prezintă schema de principiu a detecției fotonilor singulari în regim de coincidență, utilizat în circuitul descris de prezenta invenție.

Figura 2 prezintă schema electronică a circuitului descris de prezenta invenție

Figura 3 prezintă placa de circuit imprimat (PCB) a circuitului descris de prezenta invenție

Figura 4 prezintă schema bloc a unui sistem de comunicație cuantică QKD.

Notățiile se referă la: (L) = laser, (CP1), (CP2), (CP3) = controllere de polarizare, (MF1), (MF2) = modulatoare de fază, (CC) = canalul cuantic (fibra optică), (SP) = splitter polarizor (divizor), (DET1), (DET2) = detectoarele de fotoni singulari, (NC) = circuitul numărător de coincidențe fotonice.

Figura 5 prezintă schema logică a părții de program care rulează în microcontroler și realizează detectarea fotonilor în regim de coincidență.

Figura 6 prezintă o imagine cu montajul realizat fizic (în laboratorul de Inginerie Cuantică al INCDTIM Cluj-Napoca

Expunerea detaliată a invenției pentru care se solicită protecția; în această expunere trebuie să fie prezentate unul sau mai multe exemple de realizare și funcționare cu trimitere la desene; expunerea se face clar, complet și corect astfel încât o persoană de specialitate să o poată realiza fără activitate inventivă;

- în cazul în care producerea sau folosirea obiectului invenției nu rezultă explicit din descrierea sau natura invenției este necesară descrierea modului în care obiectul invenției este folosit, exploatat sau fabricat;
- în descriere pot fi prezentate formule, modele, algoritmi fără ca prezentarea obiectului invenției în exemplu de realizare să se bazeze exclusiv pe acestea

Invenția se referă la un circuit utilizat pentru detecția sincronă a fotonilor singulari, cu aplicabilitate imediată în cadrul sistemelor de criptare cuantică pentru comunicații prin fibră optică. Scopul principal al dezvoltării circuitului și algoritmului descris de prezenta invenție este oferirea unei soluții concrete și foarte accesibile pentru implementarea facilă a metodei de criptare cu cheie cuantică (QKD).

Circuitul face parte astfel din lanțul de comunicație (partea de recepție) a unui sistem de transmisie cuantică QKD pe fibră optică, a cărui schemă generală este redată pe **Figura 4** [5].

Pentru implementarea funcției de detecție și de numărare a fotonilor singulari, circuitul descris de prezenta invenție folosește un microcontroller modern de mare viteză (Teensy 4.1, 1 GHz).

Spre deosebire de sistemele detectoare de coincidență fonică prezente în acest moment în tehnică, circuitul descris de prezenta invenție propune o abordare diferită pentru implementarea funcției de numărare și detectare a coincidenței fotonilor: în loc de a detecta și număra impulsurile ale căror amplitudine trece de o tensiune prag (referință) - cum se procedează în tehnica actuală, circuitul nostru verifică în mod secvențial existența unui salt din 0 logic spre 1 logic pe frontul crescător al impulsului de intrare trimis de detectorul de fotoni (**Figura 1**, punctele **A** și **B**), apoi verifică saltul invers de pe 1 logic la 0 logic pe frontul descrescător (punctele **A'** și **B'**). Când ambele evenimente vor returna valoarea de adevăr (*true*), se confirmă existența unui impuls fonic, ceea ce conduce și la incrementarea unei variabile contor care memorează numărul evenimentelor măsurate (detectate).

În mod similar se detectează și se numără existența unor semnale de coincidență fonică, prin divizarea semnalelor de intrare (primite la mufele *BNC1* și *BNC2*, **Figura 2**) către pinii 1,3 și 6,8 ai microcontroller-ului.

În urma rulării algoritmului, se verifică dacă pe cele două grupe de câte doi pini avem o trecere din zero logic cu front crescător spre 1 logic. După un anumit interval de timp (pauză de ordinul nano-secundelor) se verifică din nou pe ambele grupe de pini, existența unui front descrescător din 1 logic spre 0 logic (aceasta indicând trecerea din impuls spre zero). Dacă în ambele situații menționate mai sus obținem valori de adevăr (*true*), algoritmul marchează obținerea unei perechi singulare de fotoni în regim de coincidență, și de asemenea se incrementează cele două variabile contor care mențin numărul de fotoni detectați.

Schema electronică utilizată este prezentată pe **Figura 2**, cu placa de circuit aferentă prezentată pe **Figura 3**. Din schema electronică au fost eliminate toate elementele care ar produce întâzieri, în vederea obținerii unei viteze de lucru cât mai mari.

(circuitul electronic prezentat pe **Figura 2** mai execută și alte funcții pe lângă cea de detecție a coincidenței fotonilor, funcții care însă nu fac obiectul acestei cereri de brevet de invenție; funcțiile "auxiliare" sunt comandate prin conectoarele *JACK1...JACK6*, iar diodele electroluminiscente *LED1...LED4* indică stările de funcționare ale circuitului)

Detectarea fronturilor crescător și descrescător (descrisă mai sus) se realizează la nivel numeric (software), prin utilizarea funcțiilor oferite de un microcontroller. **Figura 5** prezintă în limbaj pseudocod funcționarea părții de program care realizează detectarea fotonilor în regim de coincidență. Așa cum se poate vedea pe diagrama din **Figura 5**, variabila denumită *IC1* își modifică valoarea la detectarea frontului crescător ($A - A'$), respectiv descrescător ($A' - 0$) pentru semnalul 1 aplicat pinilor 1 și 3 (Figura 2).

Variabila denumită *IC2* urmărește detectarea fronturilor crescător ($B - B'$) și descrescător ($B' - 0$) pentru semnalul 2 aplicat pinilor 6 și 8 ai microcontroller-ului.

Pe **Figura 5**, instrucțiunile *AttachInterrupt ()* reprezintă instrucțiuni specifice limbajului "Arduino C", acestea atașează o funcție unui anumit pin ai microcontroller-ului, care se execută în mod automat în funcție de anumiți parametri de apel. În acest caz cuvintele rezervate *RISE* și *FALL* ne indică faptul că subrutinele aferente sunt apelate pe frontul crescător respectiv descrescător al impulsurilor provenite de la detectoarele de fotoni (în vederea determinării coincidenței).

Bibliografie

- [1] The Review of the Commercial Quantum Key Distribution System
Anton Pljonkin, Pradeep Kumar Singh
December 2018
DOI:10.1109/PDGC.2018.8745822
Conference: 2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)
- [2] Real-Time Tomography of Gas-Jets with a Wollaston Interferometer
Andreas Adelman, Benedikt Hermann, Rasmus Ischebeck
November 2017 Applied Sciences 8(3)
DOI:10.3390/app8030443
- [3] Quantum key distribution.
Secret key. BB84, E91 and B92 protocols. Continuous-variable protocols
https://mpl.mpg.de/fileadmin/user_upload/Chekhova_Research_Group/Lecture_4_12.pdf
- [4] <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>
- [5] Long-distance transmission of quantum key distribution coexisting with classical optical communication over a weakly-coupled few-mode fiber
Bi-Xiao Wang, Yingqiu Mao, Lei Shen, Lei Zhang, Xiao-Bo Lan, Dawei Ge, Yuyang Gao, Juhao Li, Yan-Lin Tang, Shi-Biao Tang, Jun Zhang, Teng-Yun Chen, and Jian-Wei Pan
Optics Express Vol. 28, Issue 9, pp. 12558-12565 (2020) • <https://doi.org/10.1364/OE.388857>

Revendicări

(1) *Circuit discriminator și algoritm pentru detecția coincidenței fotonilor singulari* **caracterizat prin aceea că** este compus dintr-un microcontroller compatibil Arduino, două mufe de tip *BNC* pentru intrarea semnalelor de la detectoarele de fotoni, șase conectoare *JACK* pentru comenzile perifericelor și patru led-uri indicatoare ale stărilor de funcționare a circuitului.

(2) *Circuit discriminator și algoritm pentru detecția coincidenței fotonilor singulari* **conform revendicării (1), caracterizat prin aceea că** detecția coincidenței impulsurilor primite la pinii de intrare se realizează numeric prin detecția trecerii pinilor de intrare din 0 logic spre 1 logic pe frontul crescător al impulsului, urmată de detecția trecerii pinilor de intrare din 1 logic spre 0 logic pe frontul descrescător al impulsului măsurat.

Desene explicative

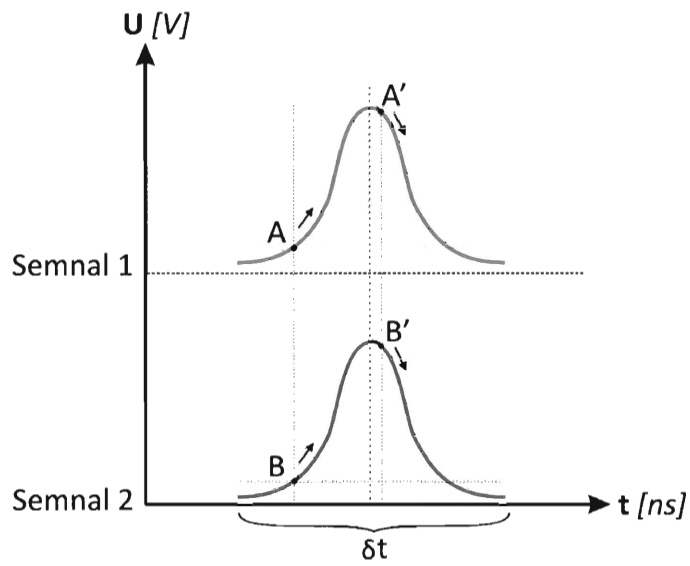


Figura 1

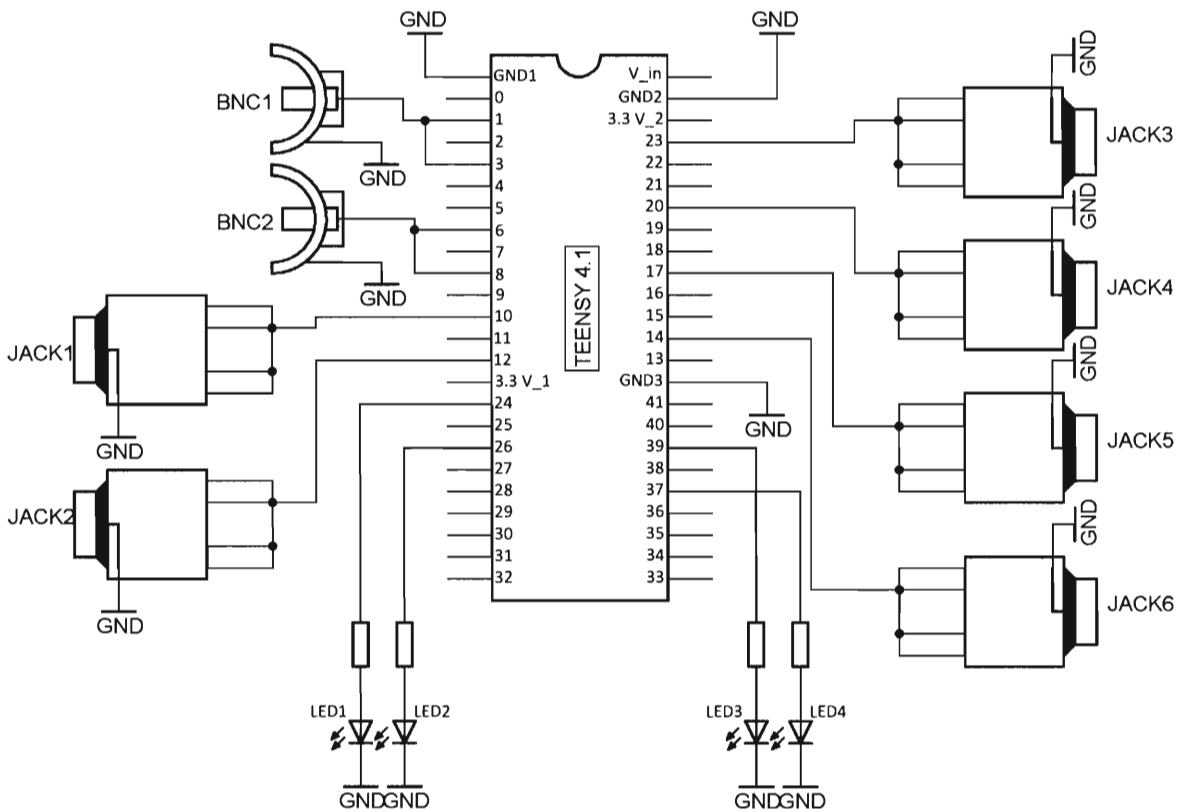


Figura 2

32

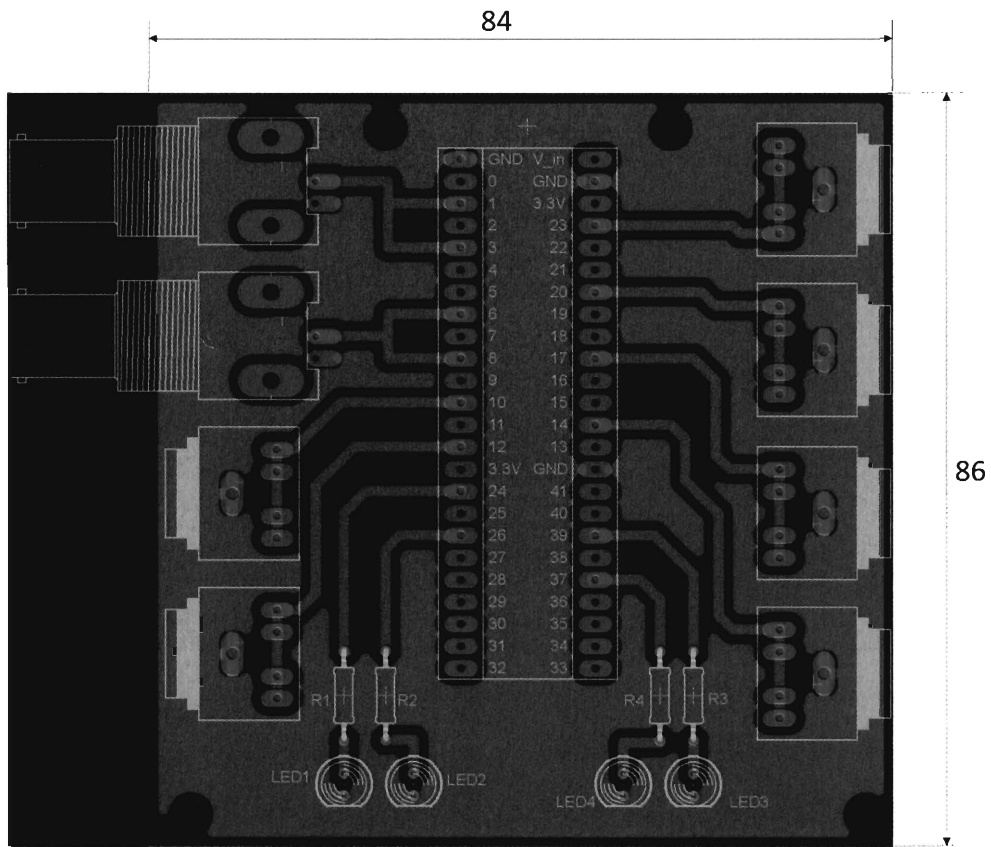


Figura 3

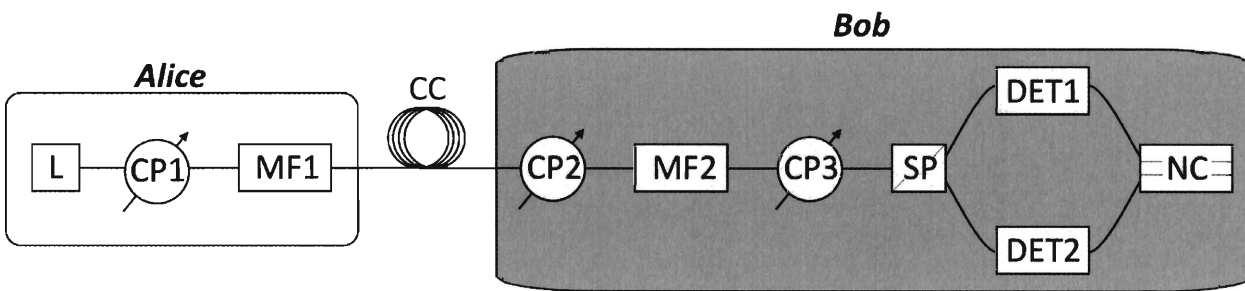
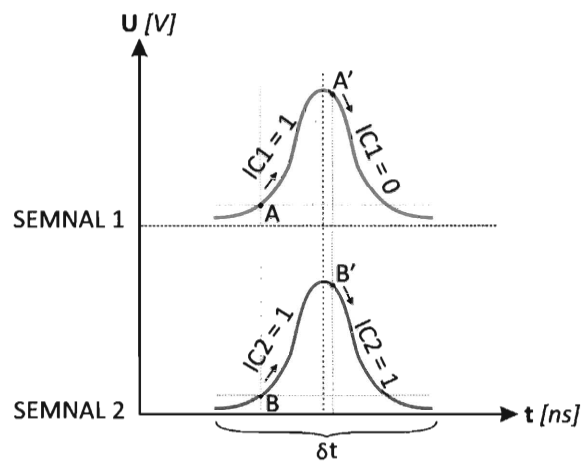


Figura 4



```

1 AttachInterrupt ( PIN_1, Subrutina1_1, RISE);
2 AttachInterrupt (PIN_6, Subrutina1_2, RISE);
3 AttachInterrupt (PIN_3, Subrutina2_1, FALL);
4 AttachInterrupt (PIN_8, Subrutina2_2, FALL);

```

```

5 Subrutina1_1:
6 {
7   Ic1 = 1;
8   counter1 ++;
9 }

```

```

10 Subrutina1_2:
11 {
12   Ic2 = 1;
13   counter2 ++;
14 }

```

```

15 Subrutina2_1:
16 {
17   Ic1 = 0;
18   ICC = ICC + Ic2;
19 }

```

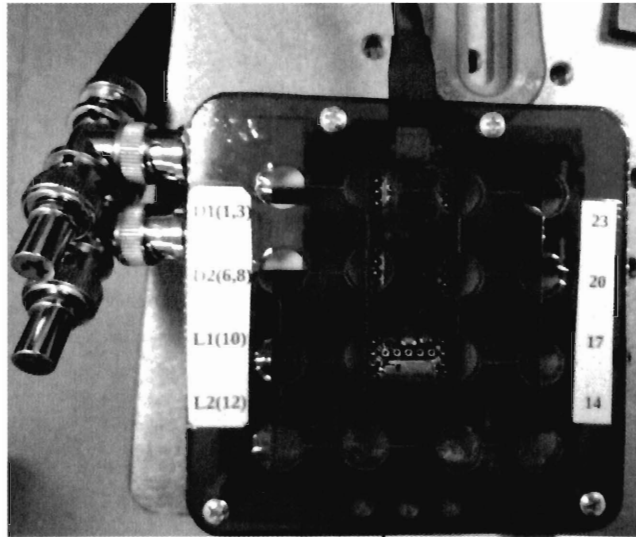
```

20 Subrutina2_2:
21 {
22   Ic2 = 0;
23 }

```

Figura 5

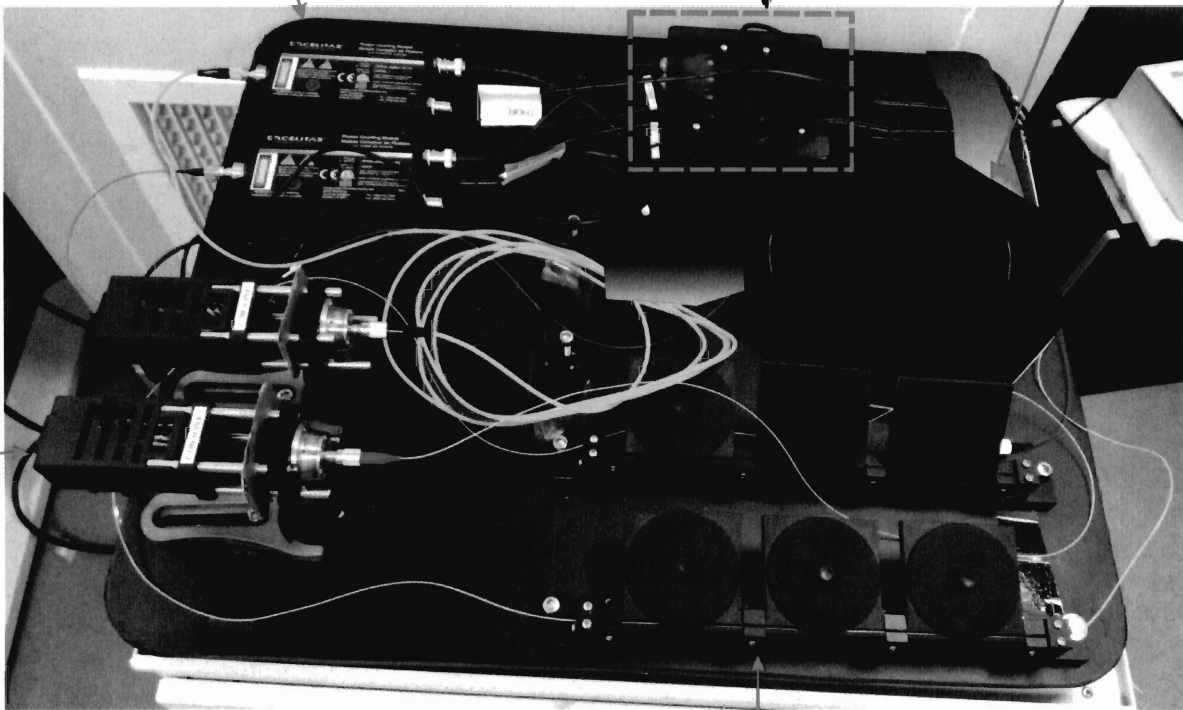
Circuitul de discriminare a fotonilor singulari



Detectoarele de fotoni

Bucula fibra optica

Laser



Modulator de polarizare

Figura 6