

## ELABORAREA DISPOZITIVULUI PENTRU STUDIAREA EFECTULUI DE TUNELARE

**Serghei ANATI**

Departamentul Microelectronică și Inginerie Biomedicală, grupa IBM-212, Facultatea Calculatoare Informatică și Microelectronică, Chișinău, Universitatea Tehnică a Moldovei, Republica Moldova

\*Autorul corespondent: Serghei Anati, [serghei.anati@mib.utm.md](mailto:serghei.anati@mib.utm.md)

Îndrumător/coordonatorul științific: **Dinu LITRA**, asistent universitar, Centrul de Nanotehnologii și Nanosenzori, Departamentul Microelectronică și Inginerie Biomedicală, Facultatea Calculatoare Informatică și Microelectronică, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

**Rezumat.** Studiul efectului de tunelare reprezintă un proces complex, care include aspecte teoretice și experimentale. La nivel teoretic, cercetătorii explorează modele matematice și principii fizice care stau la baza fenomenului de tunelare, inclusiv ecuațiile lui Schrödinger și teoria câmpurilor cuantice. Cercetările experimentale implică dezvoltarea metodelor și dispozitivelor pentru măsurarea și observarea efectului de tunelare în diferite sisteme. De exemplu, se utilizează microscopia cu tunelare de tip scanare, spectroscopia curentului de tunelare și alte metode pentru studiul fenomenului la micro și nano nivel. Aplicațiile efectului de tunelare acoperă o gamă largă de domenii cum ar fi electronică inclusiv superconductori. În plus, cercetările asupra efectului de tunelare sunt de o importanță majoră pentru dezvoltarea calculului cuantic, unde este utilizat pentru implementarea porților și operațiilor cuantice. În ansamblu, studiul efectului de tunelare nu numai că contribuie la o înțelegere mai profundă a mecanicii cuantice și a interacțiunii la micro/nano nivel, dar și deschide uși către o multitudine de inovații și aplicații în știința și tehnologii moderne.

**Cuvinte cheie:** tunelare, campuri, micro/nano nivel, dispozitiv

### Introducere

Efectul de tunelare este un fenomen cuantic în care o mică particulă, cum ar fi un electron, trece printr-o barieră de potențial, chiar dacă energia sa nu este suficientă pentru a o depăși dintr-o perspectivă clasică. Acest fenomen are aplicații importante în diferite domenii ale științei și tehnicii, cum ar fi:

- În electronică, este utilizat pentru crearea dispozitivelor specializate, cum ar fi diodele tunel și tranzistoarele, care asigură o viteză mare de funcționare și eficiență.
- În superconductori, efectele de tunelare joacă un rol major în crearea contactelor și structurilor de tunel, ceea ce este util pentru dezvoltarea calculului cuantic și a senzorilor foarte sensibili.
- Microscopia cu scanare tunel permite studierea suprafeței materialelor la nivel atomic.

Astfel, efectul de tunelare este larg utilizat în diferite domenii ale științei și tehnicii, iar înțelegerea sa joacă un rol important în tehnologiile și cercetările moderne. Pentru a obține caracteristica volt-amperică a unei diode tunel, se poate utiliza un dispozitiv specializat numit analizator parametric [1]. Acest dispozitiv este destinat măsurării dependenței curentului prin diodă de tensiunea aplicată pe aceasta. Analizatorul parametric poate furniza date precise despre curent și tensiune pentru diferite valori ale tensiunii de intrare, permițând construirea caracteristicii volt-amperice a diodei tunel.

Cu toate acestea, dispozitivele comerciale de acest tip pot avea un preț excesiv. Pentru a studia efectul de tunelare în cadrul lecțiilor de laborator, s-a luat decizia de a elabora un dispozitiv cu aceleași funcționalități la un cost mai redus. În timpul procesului de cercetare a valorilor cu un analizator parametric, diferite valori ale tensiunii de intrare pot fi setate în mod

alternativ, iar curentul corespunzător prin diodă poate fi măsurat. Aceste date pot fi apoi analizate și prezentate sub formă de grafic al caracteristicii volt-amperice.

Este important ca analizatorul parametric să fie capabil să funcționeze în condiții care să corespundă caracteristicilor diodei tunel, cum ar fi frecvențe ridicate, niveluri scăzute de curent și straturi subțiri de material, în cazul în care sunt utilizate.

### Partea tehnică

Principiul de funcționare al diodei tunel se bazează pe fenomenul de tunelare a electronilor prin bariera de potențial [2]. Dioda tunel constă din două regiuni semiconductoare, numite anod și catod, între care există un strat subțire de dielectric, numit barieră.

Atunci când se aplică o tensiune pe dioda tunel, aceasta provoacă o diferență de energie între electronii din anod și cei din catod. Dacă energia electronilor din emitor este mai mare decât cea din barieră, atunci ei pot trece prin barieră și ajunge în regiunea catodului.

Factorul cheie a diodei tunel este grosimea și înălțimea barierei de potențial. Cu o barieră suficient de subțire și o tensiune ridicată, electronii pot trece prin barieră chiar dacă nu ar avea suficientă energie pentru a o depăși conform legilor fizicii clasice.

Astfel, în anumite condiții, dioda tunel asigură o eficiență ridicată în conducerea curentului electric, deoarece o mare parte din electroni trec prin barieră datorită efectului de tunelare, ceea ce duce la o viteză mare de transport a electronilor și la o reacție rapidă la schimbările în tensiunea externă. Aceasta face ca diodele tunel să fie utile în aplicații care necesită un timp de reacție rapid și o sensibilitate ridicată, cum ar fi amplificatoarele de frecvențe înalte, generatoarele de microunde și alte dispozitive radio.

În schema elaborată pentru construirea caracteristicii curent tensiune se utilizează Arduino NANO [3] în combinație cu un senzor digital de curent și tensiune INA219 și cu interfața I2C [4], iar datele obținute sunt prezentate pe un ecran LCD cu interfață I2C [5]. Cu ajutorul acestor componente, a fost proiectată o schemă principial, prezentată în figura 1. Mediul de lucru utilizat pentru a elabora circuitul cu un cablaj imprimat este EasyEDA [6], care reprezintă un mediu de lucru cu acces liber. Aceasta furnizează o gamă largă de instrumente pentru proiectarea și testarea circuitelor, permițând utilizatorilor să creeze și să simuleze scheme electronice, să proiecteze plăci de circuit imprimate (PCB) și să colaboreze cu alți utilizatori în procesul de proiectare.

Datorită schemei principale prezentate în figura 1, toate componentele au fost amplasate pe o placă cu circuit imprimat pentru a ușura asamblarea componentelor și testarea dispozitivului. Traseele pentru dispozitivul elaborat sunt prezentate în figura 2a (vederea de jos), și figura 2b (vederea de sus). De asemenea, a fost realizat modelul 3D a dispozitivului elaborat vizualizat în figura 2c. Dimensiunea plăcuței cu cablaj imprimat pentru dispozitiv are dimensiunile de 85 mm x 65 mm.

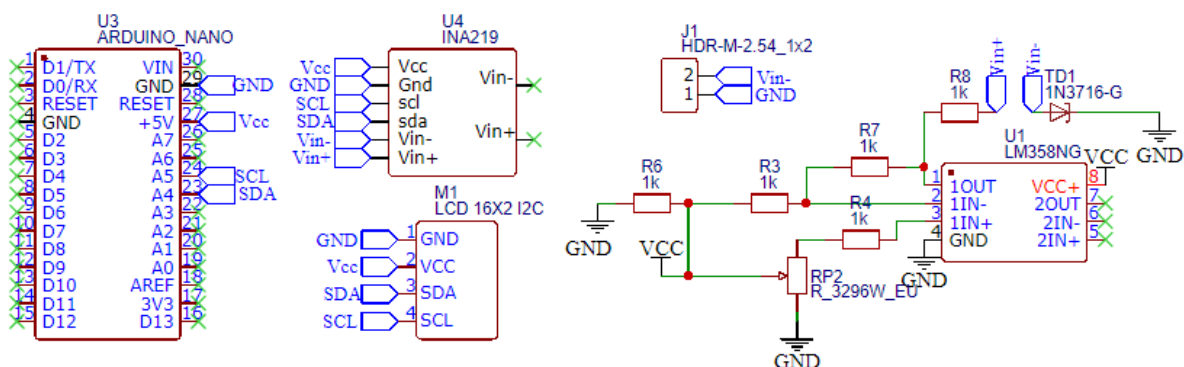


Figura 1. Schema electrică principială a unui dispozitiv pentru studierea diodei tunel

Datorită schemei principale prezentate în figura 1, toate componentele au fost amplasate pe o placă cu circuit imprimat pentru a ușura asamblarea componentelor și testarea dispozitivului. Traseele pentru dispozitivul elaborat sunt prezentate în figura 2a (vederea de jos), și figura 2b (vederea de sus). De asemenea, a fost realizat modelul 3D a dispozitivului elaborat vizualizat în figura 2c. Dimensiunea plăcuței cu cablaj imprimat pentru dispozitiv are dimensiunile de 85 mm x 65 mm.

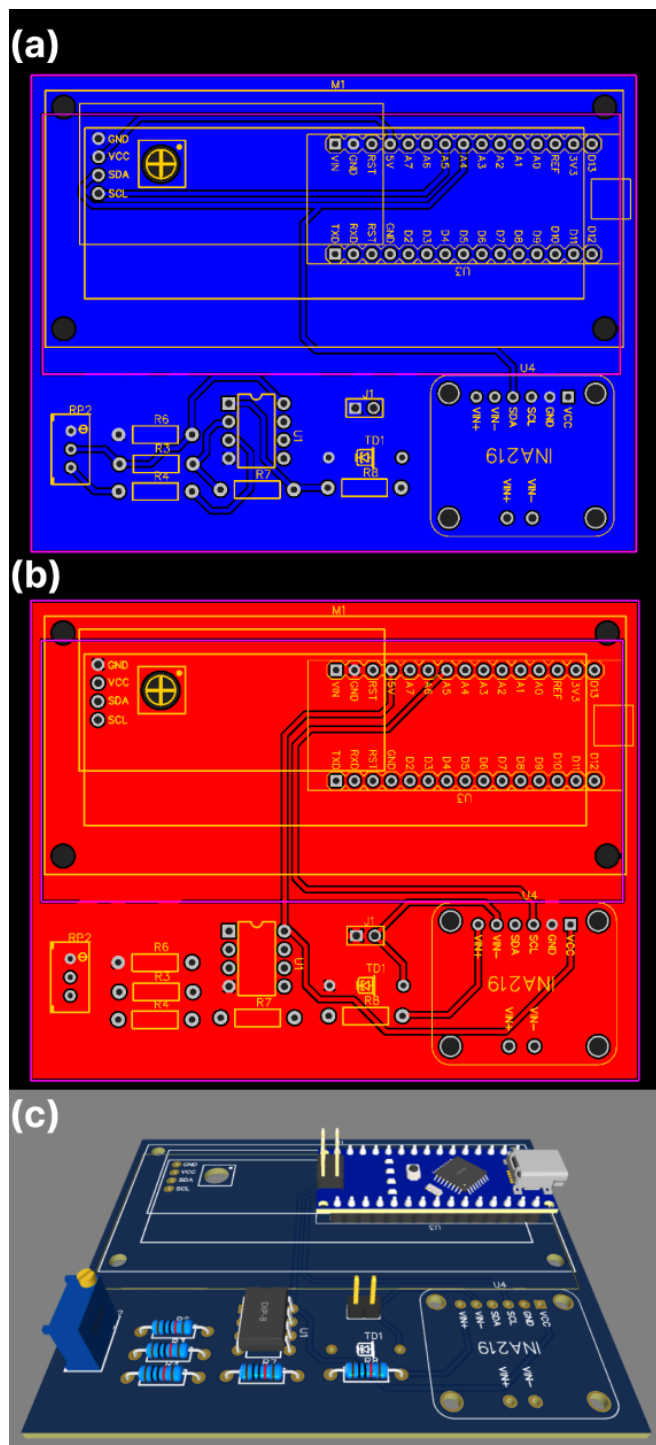


Figura 2. Imaginea PCB a dispozitivului: (a)vedere de jos, (b) vedere de sus și (c) imaginea plăcii de bază

### Concluzii

În concluzie, efectul de tunel este un fenomen cuantic important care permite particulelor mici, cum ar fi electronii, să pătrundă în barierele potențiale, deschizând calea pentru numeroase aplicații în știință și tehnologie. Acest fenomen este esențial în dezvoltarea dispozitivelor electronice avansate, cum ar fi diodele tunel și tranzistoarele care beneficiază de viteză, eficiență și performanță. Astfel, înțelegerea și exploatarea efectului de tunel joacă un rol critic în progresul tehnologic și în cercetarea actuală și viitoare. Utilizarea unui analizor parametric pentru obținerea caracteristicilor de tensiune ale diodelor tunelului este importantă pentru studierea și optimizarea acestor dispozitive, asigurând buna funcționare a acestora în anumite condiții de frecvență, curent și grosime a materialului.

Dispozitivul elaborat este unul dintre cele mai simple, ușor de utilizat și, datorită construcției modulare, este potrivit pentru reparare și ieftin în întreținere. Poate fi folosit pentru a demonstra studenților efectul tunelului în timpul lucrărilor de laborator.

### Referințe

- [1] „Как устроен туннельный диод” [Online]: <https://www.radioelementy.ru/articles/kak-ustroen-tunnelnyi-diod/>
- [2] „Туннельный эффект” [Online]: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e169.htm>
- [3] „Arduino Arduino® Nano Datasheet Available” [Online]: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>.
- [4] „Bi-Directional CURRENT/POWER MONITOR with I2 C Interface” [Online]: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551671/TI/INA219.html>
- [5] [„I2C Serial Interface 1602 LCD Module” [Online]: [https://www.handson tec.com/dataspecs/module/I2C\\_1602\\_LCD.pdf](https://www.handson tec.com/dataspecs/module/I2C_1602_LCD.pdf)
- [6] „EasyEDA” [Online]. <https://easyeda.com/editor>