

Redactare: Bianca Vișan

Tehnoredactare & pregătire de tipar: Marius Badea

Design copertă: Ionuț Broștianu

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
ANGHEL, TRAIAN**

Programarea plăcii Arduino / Traian Anghel. - Ed. a 2-a. - Pitești :

Paralela 45, 2020

Conține bibliografie

ISBN 978-973-47-3204-3

004

Traian Anghel

Copyright © Editura Paralela 45, 2020

Prezenta lucrare folosește denumiri ce constituie mărci înregistrate,
iar conținutul este protejat de legislația privind dreptul de proprietate
intellectuală.

www.edituraparalela45.ro

PROGRAMAREA PLĂCII ARDUINO

Editia a II-a

Editura Paralela 45

Cuprins

Introducere	9
Capitolul 1. Noțiuni de electricitate	14
1.1. Structura corpurilor	14
1.2. Sarcina electrică	18
1.3. Conductori, izolatori, semiconductori	20
1.4. Legea lui Coulomb. Câmpul electric	23
1.5. Potențialul electric. Tensiunea electrică	27
1.6. Condensatorul. Capacitatea electrică	29
1.7. Curentul electric. Circuitul electric	31
1.8. Intensitatea curentului electric	33
1.9. Rezistența electrică. Rezistivitatea	36
1.10. Surse electrice. Tensiunea electromotoare	38
1.11. Legile circuitelor electrice	40
1.12. Energia și puterea electrică	44
1.13. Potențiometrul	47
1.14. Fotorezistorul	47
1.15. Sistemul Internațional. Multipli și submultipli	50
Capitolul 2. Noțiuni de programare	52
2.1. Sisteme de numerație	52
2.2. Algoritmi	55
2.3. Limbajul pseudocod	57
2.4. Programarea structurată	61
2.5. Introducere în limbajul C++	66
2.6. Instrucțiunile limbajului C++	73
2.7. Funcții în C++	79
2.8. Programarea orientată pe obiect în C++	83
Capitolul 3. Prezentarea placii și a mediului de dezvoltare Arduino	94
3.1. Placa de dezvoltare Arduino	94
3.2. Instalarea IDE Arduino Software	100

3.3. Conectarea plăcii Arduino la PC	101
3.4. Biblioteci Arduino	102
3.5. Software suplimentar	105
3.6. Bootloader-ul Arduino	106
Capitolul 4. Bazele programării plăcii Arduino	109
4.1. Structura unui program Arduino	109
4.2. Compilarea și încărcarea sketch-ului pe placă Arduino	111
4.3. Primul sketch Arduino	112
4.4. Breadboard, fire de legătură și LED-uri	115
4.5. Intrări și ieșiri digitale	118
4.6. Generarea semnalelor PWM	123
4.7. Utilizarea întreruperilor	125
4.8. Intrări analogice	128
4.9. Afisarea datelor folosind LCD-uri	137
4.10. Generarea sunetelor	143
Capitolul 5. Interfețe de comunicație	146
5.1. Porturi analogice și digitale	146
5.2. Interfață serială	147
5.3. Interfață SPI	150
5.4. Interfață I ² C	152
Capitolul 6. Aplicații bazate pe senzori	156
6.1. Măsurarea temperaturii și umidității	156
6.2. Măsurarea nivelului de iluminare	159
6.3. Măsurarea distanței	162
6.4. Măsurarea nivelului de fum	165
6.5. Măsurarea forței	167
6.6. Măsurarea inducției magnetice	169
6.7. Detectarea mișcării	178
6.8. Detectarea înclinării	181
6.9. Detectarea ploii	183
6.10. Măsurarea presiunii atmosferice	186
6.11. Detectarea sunetului	189

Capitolul 7. Comunicația prin Bluetooth	193
7.1. Standardul Bluetooth	193
7.2. Conectarea modulului HC-06 la placă Arduino UNO R3	195
7.3. Proiect: comunicarea între Arduino și calculator prin Bluetooth	195
7.4. Proiect: comunicarea între Arduino și telefon prin Bluetooth	201
7.5. Proiect: telefonul, telecomandă Bluetooth pentru Arduino	204
Capitolul 8. Comunicația în rețele Ethernet și în Internet	205
8.1. Standardul Ethernet	205
8.2. Internet și Web: organizare și accesare	211
8.3. Shield Ethernet	219
8.4. Conectarea și testarea shield-ului Ethernet	220
8.5. Client Web cu Arduino	226
8.6. Server Web cu IP dinamic	228
8.7. Proiect: server Web pentru monitorizarea camerei	230
8.8. Proiect: postarea unui tweet folosind Arduino	234
8.9. Proiect: salvarea datelor măsurate folosind PHP și MySQL	237
8.10. Proiect: server Web care folosește un card micro-SD	250
Capitolul 9. Comunicația în rețele Wi-Fi și în Internet	256
9.1. Rețele Wi-Fi	256
9.2. Conectarea plăcii Arduino la o rețea Wi-Fi	258
9.3. Scurtă prezentare a modulului ESP8266	258
9.4. Prezentarea plăcii NodeMCU	260
9.5. Proiect: client Web cu NodeMCU	261
9.6. Proiect: server Web cu NodeMCU	264
9.7. Proiect: monitorizarea nivelului de iluminare cu NodeMCU	269
9.8. Proiect: stație meteo cu NodeMCU	272
9.9. Instalarea firmware-ului LUA pe NodeMCU	275
9.10. Proiect: server Web cu NodeMCU și LUA Script	279
Capitolul 10. Comunicația prin GSM	282
10.1. Standardul GSM	282
10.2. Shield GSM	282
10.3. Proiect: sistem de alarmare prin GSM	283

Capitolul 11. Controlul motoarelor	291
11.1. Motoare de curent continuu	291
11.2. Proiect: comanda a două motoare de curent continuu.....	294
11.3. Proiect: modificarea dinamică a vitezei motoarelor DC	297
11.4. Motoare pas cu pas.....	299
11.5. Proiect: controlul rotației unui motor pas cu pas.....	300
11.6. Servomotoare	302
11.7. Proiect: controlul unui servomotor.....	304
Capitolul 12. Programarea plăcii Arduino cu LabVIEW	307
12.1. Introducere în LabVIEW	307
12.2. Cum se utilizează LabVIEW cu Arduino.....	308
12.3. Analiza unui instrument virtual.....	310
12.4. Proiect: măsurarea temperaturii și a iluminării	314
Capitolul 13. Internetul lucrurilor	318
13.1. Avantaje și dezavantaje ale utilizării IoT	318
13.2. Servicii IoT	320
13.3. Proiect: monitorizarea temperaturii cu ThingSpeak.....	321
13.4. Proiect: monitorizarea nivelului de iluminare cu Ubidots	335
13.5. Proiect: monitorizarea temperaturii cu NodeMCU și Ubidots	343
13.6. Proiect: utilizarea platformei Thethings.....	345
Bibliografie.....	348
Cărți.....	348
Web	349

Introducere

„Lucrul cel mai important este să nu încetezi să pui întrebări.
Curiozitatea are propria rațiune de a exista.”

Albert Einstein

Astăzi, singura constantă este schimbarea, lumea transformându-se într-un ritm nemaîntâlnit. În zilele noastre, suntem martorii începutului celei de-a patra revoluții industriale¹, care constă în pătrunderea rapidă a tehnologiilor digitale în toate domeniile. „Viitorul este aici, doar că nu este uniform distribuit”, spunea cândva William Gibson, scriitor canadian de origine americană. La fel se întâmplă și acum, când noua revoluție industrială se manifestă deja în zone diverse ale activității omului, cuprinzând treptat un număr mare de sectoare ale activității economice, sociale, dar și personale a acestuia.

Tehnologia avansată pătrunde în toate domeniile, inclusiv în cele care până nu de mult păreau a fi „ferite” de aceasta. Automatizarea casei (*home automation*) este un concept care se dezvoltă extrem de rapid. De exemplu, se pot controla luminile din casă, precum și sistemele de încălzire, de aer condiționat și de securitate ale acesteia. De asemenea, se pot utiliza diverse *gadgeturi* în apropierea casei (cu care, de exemplu, sunt controlate temperatura și umiditatea aerului din sera de flori sau de legume) sau în drumul către casă (e.g. se pornește mașina de spălat).

În următorul deceniu, mai mult de un trilion de senzori vor fi conectați la Internet, conform afirmațiilor făcute la Forumul Economic Mondial de la Davos, 2016. Aceștia vor trimite diverse informații omului, dar vor comunica și între ei, scopul acestei uriașe „desfășurări de forțe” fiind de a oferi omului un trai mai bun, mai confortabil și mai sigur.

¹ Această idee a fost avansată la cea de-a 46-a ediție a Forumului Economic Mondial, desfășurată la Davos (Elveția), în perioada 20-23 ianuarie 2016.

„Studiază mai întâi știința și continuă apoi cu practica născută din această știință!”

Leonardo da Vinci

În primul capitol sunt prezentate succint o serie de noțiuni de electricitate necesare pentru buna înțelegere a lucrării, în special a exemplelor practice oferite în cadrul acesteia. Precizăm că noțiunile prezentate în capitolul de față se regăsesc între cele incluse în programele de fizică pentru gimnaziu și de liceu, fiind astfel accesibile tuturor persoanelor interesate de buna înțelegere a lucrării.

1.1. Structura corpurilor

Eforturile depuse de savanți de-a lungul secolelor – în special fizicieni și chimici – au permis obținerea unei imagini bogate și complexe a realității înconjurătoare, în particular a structurii corpurilor.

Astăzi, se știe că toate corpurile, indiferent de starea de agregare a acestora, sunt compuse din atomi și molecule. Moleculele sunt structuri alcătuite din atomi uniți prin câteva tipuri de legături chimice (e.g. covalentă, ionică). Un tip special de legătură este cea metalică.

După încercarea de pionierat¹ din 1904 a lui J.J. Thomson (care a elaborat un model simplificat al atomului, supranumit „cozonacul cu stafide”), structura atomului a fost dezvăluită în 1911 de către fizicianul Ernest Rutherford (1871-1937), laureat al premiului Nobel pentru chimie (1908), considerat „părintele” fizicii nucleare și cel mai mare experimentator după Michael Faraday. Rutherford a formulat, ca urmare a celebrelor sale experiențe de împrăștiere a particulelor alfa² pe foișe metalice subțiri,

¹ Menționăm că primul model atomic a fost cel al lui Dalton (1766-1844). Conform acestuia, atomul este sferic și fără structură internă, atomii același element fiind identici, dar diferiți de atomii altor elemente.

² Particulele alfa (α) sunt nuclee de heliu (i.e. atomi de heliu care au cedat prin ionizare ambii electroni), cu o sarcină pozitivă de două ori mai mare decât cea a electronului și cu o masă de circa 7300 de ori mai mare decât masa unui electron.

modelul planetar al atomului (figura 1). În cadrul acestui model, atomul este similar cu sistemul planetar, în cadrul căruia – după cum se știe – planetele (inclusiv Pământul) se rotesc pe orbite aproximativ circulare în jurul Soarelui.

În cadrul modelului elaborat de Rutherford, atomul (având raza de circa $10^{-10} \div 10^{-9}$ m) este alcătuit dintr-un înveliș electronic și un nucleu (având raza de circa $10^{-15} \div 10^{-14}$ m), în jurul căruia se rotesc pe orbite circulare electronii. În modelul planetar al atomului a fost introdusă prima oară în fizică noțiunea de nucleu atomic.

Electronul (cu simbolul e^-) este o particulă elementară, cu sarcina electrică negativă și egală în modul cu sarcina electrică elementară (pentru detalii, a se citi secțiunea următoare), având masa foarte mică³:

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (1)$$

Electronii unui atom formează învelișul electronic al acestuia. Numărul electronilor unui atom se numește număr atomic și se notează cu Z .

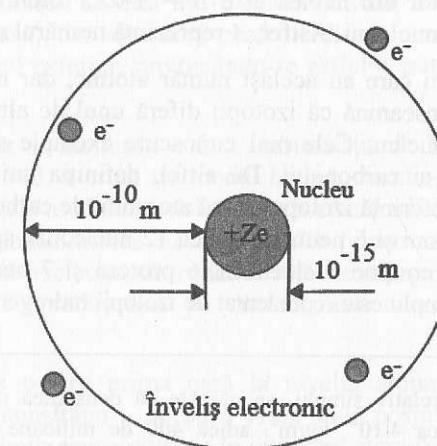


Figura 1. Modelul planetar al atomului

Nucleul atomic, conținând aproape întreaga masă a atomului⁴, este încărcat pozitiv, fiind alcătuit din protoni⁵ (Rutherford, 1920) și neutroni

³ Masa unui electron este de circa 1840 de ori mai mică decât masa nucleului celui mai ușor atom din natură (atomul de hidrogen).

(Chadwick, 1932). Masele protonului și neutronului sunt foarte apropiate și practic egale cu o unitate atomică de masă:

Respect pentru oameni și cărti

$$u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (2)$$

Spre deosebire de neutron (având simbolul n), care este neutru din punct de vedere electric, protonul (având simbolul p) este încărcat cu o sarcină electrică pozitivă, egală cu cea elementară.

Numărul protonilor din nucleu este egal cu Z , astfel încât în condiții fizice și chimice obișnuite, atomul este neutru din punct de vedere electric, adică sarcina electrică totală a acestuia este nulă:

$$Q_{atom} = Q_{electroni} + Q_{nucleu} = Z \cdot (-e) + Z \cdot e = 0 \quad (3)$$

Numărul total al protonilor și neutronilor din nucleu se numește număr de masă și se notează cu A . Denumirea este justificată, deoarece masa atomului este aproximativ egală cu cea a nucleului, iar masa acestuia din urmă – exprimată în unități atomice de masă – este practic egală cu A . Numărul neutronilor din nucleu este $N = A - Z$. Protonii și neutronii se numesc împreună nucleoni. Astfel, A reprezintă numărul nucleonilor.

Izotopii sunt atomi care au același număr atomic, dar numere de masă diferite, ceea ce înseamnă că izotopii diferă unul de altul prin numărul neutronilor⁶ din nucleu. Cele mai cunoscute exemple sunt izotopii hidrogenului și cei ai carbonului. De altfel, definiția unității atomice de masă include ca referință izotopul 12 al atomului de carbon⁷, care conține 6 electroni, 6 protoni și 6 neutroni (adică 12 nucleoni), spre deosebire de izotopul 13, care conține 6 electroni, 6 protoni și 7 neutroni (adică 13 nucleoni). Alt exemplu este reprezentat de izotopii hidrogenului: hidrogenul

⁴ Printr-un calcul relativ simplu, se găsește că densitatea medie a nucleului atomic este de circa $4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$, adică 400 de milioane de tone pe cm^3 ! Comparați această valoare cu densitatea apei: 1000 kg/m^3 sau 1 g/cm^3 !

⁵ Denumirea provine de la cuvântul grec *protos*, care înseamnă primul, deoarece protonul este nucleul primului element al tabelului periodic (hidrogenul).

⁶ Termenul izotop provine din limba greacă: *isos* – același, *topos* – loc. El precizează astfel că izotopii unui element chimic ocupă aceeași căsuță în tabelul periodic. Denumirea a fost introdusă de F. Soddy în 1913.

⁷ A 12-a parte din masa izotopului de carbon 12 se numește unitate atomică de masă, notată cu simbolul u .

propriu-zis (1 electron și 1 proton), deuteriu (1 electron, 1 proton și 1 neutron) și tritiu (1 electron, 1 proton și 2 neutroni). Izotopii au proprietăți chimice identice (deoarece au aceeași structură a învelișului electronic), dar au proprietăți fizice în general diferite.

Prin element chimic se înțelege o specie de atomi identici, având același număr de electroni în învelișul electronic și același număr de protoni în nucleu. După cum se poate observa, definiția prezentată nu se referă la numărul neutronilor din nucleu, ceea ce înseamnă că un element chimic include toți izotopii săi.

Elementele chimice, al căror număr este de 118^8 , sunt incluse în tabelul periodic al elementelor, care poartă numele cunoscutului chimist rus Dimitri Mendeleev⁹ (1834-1907). Acestea sunt ordonate în funcție de proprietățile lor fizice și chimice, în grupe (în număr de 18) și perioade (în număr de 7).

În condiții normale (i.e. temperatura de zero grade Celsius și presiunea de o atmosferă), corpurile alcătuite din elementele chimice prezente în tabelul lui Mendeleev se află într-o anumită stare de agregare (solidă, lichidă sau gazoasă), dar aceasta se poate modifica în urma schimbului de căldură cu mediul exterior, producându-se astfel o transformare de stare de agregare.

Modelul planetar al atomului a fost îmbunătățit de Niels Bohr (1885-1962) care, în 1913, a creat un model hibrid, quanto-mecanic, pentru a elimina deficiențele modelului elaborat de Rutherford, dintre care cea mai importantă este instabilitatea electrodinamică (electronul, în mișcarea sa accelerată în jurul nucleului, ar trebui să radieze energie electromagnetică și, în final, să se prăbușească pe nucleu, ceea ce – evident – nu se întâmplă).

Bohr a introdus pentru prima oară la nivelul atomului conceptual de cuantificare, demonstrând – pe baza celor două postulate care îl poartă numele – că mărimile fizice utilizate în interiorul atomului sunt cuantificate

⁸ În ianuarie 2016 au fost adăugate tabelului periodic ultimele elemente chimice (având numerele atomice 113, 115, 117 și 118).

⁹ Dmitri Mendeleev a publicat pentru prima oară (în 1869) un tabel periodic al elementelor, asemănător cu cel actual. Elementul chimic 101 al acestui tabel îi poartă numele (*mendeleeviu*).

(e.g. raza orbitelor electronice, energia stărilor staționare). Modelul atomic al lui Bohr a fost perfecționat ulterior de către Arnold Sommerfeld, care în 1915 a elaborat modelul Bohr-Sommerfeld.

Respect pentru oameni și cărti

Un model complet al atomului este furnizat de mecanica cuantică (Erwin Schrödinger, 1926). În cadrul modelului respectiv, bazat pe interpretarea statistică a funcției de undă (Max Born, 1926), noțiunea de orbită electronică este înlocuită cu cea de orbital electronic, acesta reprezentând distribuția spațială a probabilității de localizare a electronului.

1.2. Sarcina electrică

Prin procedee specifice (frecare, contact, inducție), corpurile pot fi aduse într-o stare specială, numită stare de electrizare, în care interacționează între ele prin forțe, numite forțe electrice, acestea fiind de atracție sau de respingere. Fenomenul de electrizare este cunoscut încă din Antichitate, când Thales din Milet (sec. al VI-lea î.Hr.) a studiat proprietatea chihlimbarului (piatră prețioasă, de origine organică) de a atrage corpuri ușoare când este frecat.

Starea de electrizare este caracterizată cantitativ folosind o mărime fizică denumită sarcină electrică. Înțând seama de existența celor două tipuri de interacții – de atracție și de respingere – rezultă că sarcina electrică este de două feluri, negativă și pozitivă. Corpurile încărcate cu sarcină electrică de același semn se resping, iar cele încărcate cu sarcină electrică de semne opuse se atrag.

Denumirile de sarcină electrică negativă și pozitivă au fost introduse de Benjamin Franklin (1706-1790). Acesta a denumit electricitatea care apare prin frecare cu o bucată de mătase pe (bagheta de) sticlă, *pozitivă*, iar cea de pe *ebonită*, negativă, denumiri care – după cum se știe – s-au păstrat până astăzi.

În procesul de electrizare a corpurielor nu este generată sarcină electrică, ci are loc un proces de separare sau de transferare a sarcinii electrice existente.

În Sistemul Internațional (SI), sarcina electrică este o mărime fizică derivată, definită prin relația $Q = I \cdot t$, unde I este intensitatea unui curent electric staționar care străbate un conductor în timpul t . De asemenea, în SI, unitatea de măsură a sarcinii electrice este derivată. Aceasta se numește *coulomb* – cu simbolul C – și este definită prin relația:

$$[Q]_{SI} = 1C = [I]_{SI} \cdot [t]_{SI} = A \cdot s \quad (4)$$

Cea mai mică sarcină electrică pusă în evidență este cea a unui electron. Valoarea absolută a acesteia se numește sarcină electrică elementară:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C \quad (5)$$

Înțând seama de ceea ce s-a prezentat în subcapitolul anterior, rezultă că electrizarea corpuriilor se poate explica foarte simplu prin surplusul sau deficitul de electroni în raport cu starea neutră. Acesta este motivul pentru care sarcina electrică a unui corp este întotdeauna egală cu un multiplu întreg al sarcinii elementare:

$$Q = ne, \text{ unde } n \in \mathbb{Z} \quad (6)$$

În stare neutră, corpurile conțin cantități egale de sarcină electrică pozitivă și negativă. Prin frecare – acesta fiind unul dintre procedeele de electrizare, după cum s-a văzut – o mică sarcină electrică se transferă de la un corp la altul, perturbând astfel starea lor neutră. De exemplu, prin frecarea unei baghete de sticlă cu o bucată de mătase, sticla devine pozitivă, iar mătasea negativă, ceea ce înseamnă că un număr de electroni au trecut de la sticla la mătase. Sticla rămâne cu un deficit de electroni (ceea ce explică încărcarea pozitivă), iar mătasea capătă un surplus de electroni (ceea ce explică încărcarea negativă).

O mărime fizică având numai anumite valori permise (cum este sarcina electrică) se numește mărime cuantificată¹⁰. Se mai spune că sarcina electrică are proprietatea de cuantificare sau că are un caracter discret¹¹. Sarcina electrică elementară se mai numește cantă de sarcină electrică.

Cuantificarea sarcinii electrice nu este observabilă la nivel macroscopic deoarece sarcina electrică elementară este foarte mică. În acest caz, se poate vorbi de o distribuție continuă a sarcinii electrice.

¹⁰ Cuantificarea stă la baza fizicii moderne. La nivel atomic și nuclear, toate mărimile fizice sunt cuantificate (e.g. energia, momentul cinetic).

¹¹ Natura discretă a sarcinii electrice a fost demonstrată experimental de fizicianul R.A. Millikan, într-un experiment celebru care îi poartă numele, efectuat în 1911.

În cazul unui sistem de corpuri care nu schimbă sarcină electrică cu exteriorul, adică este izolat din punct de vedere electric, sarcina poate trece de la un corp la altul în cursul interacțiunilor dintre acestea, adică se redistribuie, dar valoarea sa totală (i.e. suma sarcinilor electrice ale tuturor corpurilor) rămâne constantă în timp. Se spune că sarcina electrică se conservă. Aceasta este o altă proprietate a sarcinii electrice.

$$Q = \sum_{k=1}^n Q_k = \text{const.} \quad (7)$$

1.3. Conductori, izolatori, semiconductori

Dacă un corp metalic ținut în mâna va fi supus unui procedeu de electrizare (de exemplu, va fi frecat cu o bucată de blană), acesta nu se va încărca electric. Totuși, se constată că un metal este posibil să se încarce cu sarcină electrică, dacă are un mâner de sticlă sau de ebonită și este ținut de acesta în cursul frecării, fără a fi atins cu mâna. Constatarea poate fi explicată dacă se acceptă clasificarea corpurilor în *conductori* (sau corpuri conduceatoare de electricitate) și *izolatori* (sau corpuri care nu conduc electricitatea). Din categoria conductorilor fac parte metalele, corpul omenesc și pământul, iar din cea a izolatorilor (numiți și *dielectriți*) fac parte sticla, ebonita, plasticul etc.

Deosebirea dintre conductori și izolatori este dată de faptul că în interiorul conductorilor există sarcini electrice libere (care se pot deplasa), în timp ce în izolatori nu există astfel de sarcini. Totuși, nu există materiale perfect izolatoare.

Purtătorii de sarcină electrică liberi în metale sunt electronii, care – având această caracteristică – poartă denumirea de electroni liberi. Apariția electronilor liberi într-un metal poate fi explicată ținând seama că la formarea acestuia din mai mulți atomi identici aduși unul în apropierea celuilalt, electronii de valență (slabi legați de nucleu) nu rămân localizați pe atomii din care provin, ci sunt delocalizați, aparținând în egală măsură tuturor ionilor metalului, formând un aşa-numit nor sau gaz electronic. În naștere astfel legătura metalică, în care norul de electroni, situat în spațiul dintre ioni, exercită forțe de atracție electrostatică asupra acestora. Deoarece legătura metalică constituie o partajare colectivă a electronilor metalului, ea nu este direcționată.

În alte categorii de corpuri conduceatoare, ambele tipuri de purtători de sarcină (e.g. ioni pozitivi și ioni negativi în electrolizi sau electroni și ioni pozitivi în gaze) se pot deplasa liber prin interiorul acestora.

Există o a treia categorie de materiale, intermediară între conductori și izolatori din punct de vedere al proprietății de conductie a sarcinii electrice, denumite semiconductori. Conductibilitatea materialelor semiconductoare – siliciul (Si) și germaniu (Ge) fiind reprezentative pentru această categorie – se poate mări foarte mult prin adăugarea altor elemente, denumite impurități (e.g. arsen, bor, indiu, aluminiu, stibiu), în cantități foarte mici, procedeu cunoscut sub numele de dopare. Semiconductori fără impurități se numesc intrinseci, iar cei cu impurități se numesc extrinseci. Semiconductori extrinseci pot fi de tip n (cu impurități donoare) și de tip p (cu impurități acceptoare).

Într-un semiconductor, indiferent dacă este intrinsec sau extrinsec, se pot deplasa – participând astfel la conduction electrică – două tipuri de purtători de sarcină electrică: electroni și goluri. În teoria zonală (de benzi) a solidelor cristaline¹², într-un semiconductor electronii se deplasează la nivelul benzii de conduction, iar golurile la nivelul benzii de valență. Trebuie reținut că golul are o realitate fizică numai într-un solid cristalin, reflectând un anumit mod de comportare a electronilor de valență. În acest sens trebuie înțeleasă și denumirea de cvasiparticulă atribuită golului.

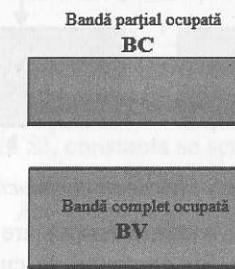


Figura 2. Benzi de energie pentru metale

În teoria benzilor de energie, există o tratare unitară a tuturor materialelor solide (metale, izolatori și semiconductori), clasificarea acestora făcându-se

¹² Solidele cristaline (e.g. metalele, semiconductoare) se caracterizează printr-o aranjare spațială ordonată a atomilor sau moleculelor componente. Solidele caracterizate printr-o aranjare neregulată a particulelor componente se numesc corpuri amorse (e.g. sticla, smoala).

în funcție de gradul de ocupare cu electroni a benzii de conducție (BC) sau de lărgimea E_g a benzii interzise (BI)¹³, situată între banda de conducție și banda de valență (BV), astfel:

- metalele au BC parțial ocupată cu electroni (figura 2). Prin aplicarea unui câmp electric slab, se furnizează suficientă energie electronilor pentru a-i deplasa în interiorul BC;
- semiconductorii au la temperatura de 0 K (zero Kelvin) BV complet ocupată cu electroni, iar BC este complet goală și separată de BV prin BI cu lărgimea $E_g < 3$ eV¹⁴ (figura 3);
- izolatorii (sau dielectricii) au la temperatura de 0 K BV complet ocupată cu electroni, iar BV este complet goală și separată de BC prin BI cu lărgimea $E_g > 3$ eV (figura 3).

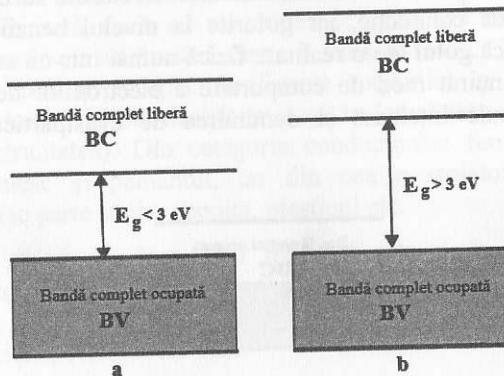


Figura 3. Benzi de energie pentru semiconductori (a) și izolatori (b)

În cazul semiconductorilor, banda interzisă are o lărgime (e.g. 0,72 eV pentru Ge și 1,1 eV pentru Si) comparabilă cu energia pe care o poate căștiga un electron sub acțiunea unui câmp electric, prin iluminare sau

¹³ Lărgimea benzii interzise, numită și energie de activare, exprimă energia necesară unui electron aflat în banda de valență pentru a deveni liber. Mărimea acesteia arată că de puternic sunt legați acești electroni de atomii cărora le aparțin.

¹⁴ Electron-voltul (având simbolul eV) este o unitate de măsură a energiei, utilizată la nivel microscopic. Aceasta se definește ca fiind energia pe care o căștigă un electron accelerat sub o diferență de potențial de un volt. Se obține că $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (Joule).

prin încălzire. Acesta este motivul pentru care la temperatura camerei, datorită mișcării termice, există în semiconductori electroni liberi la nivelul BC, care pot participa la conducția electrică¹⁵. De asemenea, odată cu creșterea temperaturii, numărul electronilor liberi crește în semiconductori¹⁶, spre deosebire de metale, în care rămâne constant. În cazul izolatorilor, energia de activare este atât de mare, încât prin încălzire practic nu apar purtători de sarcină liberi.

1.4. Legea lui Coulomb. Câmpul electric.

Forțele electrice exercitate între corpurile electrizate au fost măsurate pentru prima oară de către fizicianul Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), care, folosind datele experimentale pe care le-a acumulat, a formulat în anul 1784 legea interacțiunii electrice, care îi poartă numele. Pentru măsurarea forței electrice, acesta a folosit o balanță de torsione similară cu cea utilizată de Cavendish pentru măsurarea forțelor gravitaționale dintre corperi.

Conform legii lui Coulomb, forța de interacție electrică dintre două corperi punctiforme electrizate este orientată de-a lungul dreptei care le unește, având mărimea proporțională cu produsul sarcinilor electrice și invers proporțională cu pătratul distanței dintre acestea.

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \vec{r} \quad (8)$$

Valoarea constantei k depinde de mediul în care se află cele două corperi punctiforme electrizate. În SI, constanta se scrie astfel:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \quad (9)$$

¹⁵ Energia medie de agitație termică se calculează cu formula kT , unde k este constanta lui Boltzmann, iar T este temperatura absolută. La 300 K (adică 27°C, temperatura camerei), energia respectivă este de aproximativ 0,025 eV. Deoarece aceasta este numai o valoare medie, unor electroni li se poate furniza energie termică mai mare, comparabilă cu lărgimea benzii interzise, astfel încât pot ajunge din banda de valență în banda de conducție.

¹⁶ La siliciu pur, concentrația electronilor liberi crește de la 10^{17} m^{-3} (la temperatura camerei) până la 10^{24} m^{-3} la 700°C.