

Universitatea Tehnică a Moldovei

Artur Buzdugan, Victor Şontea

DISPOZITIVE MICROOPTOELECTRONICE

Pontos

Chişinău, 2020

Aprobat pentru publicare prin Decizia Senatului UTM, pr.v. nr.2 din 22.09.2020.

Autori:

Artur Buzdugan, dr.habilitat - inginer,
Victor Şontea, prof. univ., dr. - inginer.

Recenzenţi:

Leonid Culiuc, Academician, prof. univ., dr. habilitat;
Serghei Railean, conf. univ., dr.

Manualul Dispozitive Microoptoelectronice a fost elaborat conform planului editorial al DMIB FCIM UTM.

Manualul este destinat studenţilor specialităţilor Microelectronica şi Nanotehnologii, Ingineria Biomedicală, altor specialităţi tangente, cadrelor didactice, doctoranzilor, persoanelor interesate de acest domeniu. Manualul reflectă exclusiv punctul de vedere al autorilor.

Tehnoredactare computerizată:

Coperta:

Descrierea CIP a Camerei Naţionale a Cărţii

Buzdugan, Artur,

Dispozitive microoptoelectronice: Pentru studenţii specialităţii “Ingineria biomedicală”, “Microelectronica şi nanotehnologii” / Artur Buzdugan, Victor Şontea, Universitatea Tehnică a Moldovei. – Chişinău: Pontos, 2020, Tipogr. „Europress”. – 484 p. : fig., tab. Bibliogr. la sf. cărţii. - 80 ex.

ISBN 978-9975 72 512-5.

621.38(075.8)

B98

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE	7
FOREWORD	9
I. ELEMENTE ALE FIZICII SEMICONDUCTORILOR	11
1.1. SUCCINT PRIVIND TEORIA BENZILOR DE ENERGIE	11
1.2. FUNCȚIA DISTRIBUȚIEI FERMI-DIRAC	17
1.3. SEMICONDUCTORI ÎN ECHILIBRU	19
1.4. CONCENTRAȚIA INTRINSECĂ	22
1.5. ENERGIA DE IONIZARE	28
1.6. CONCENTRAȚIA EXTRINSECĂ	30
1.7. STATISTICA DONORILOR ȘI ACCEPTORILOR	35
1.8. NEUTRALITATEA SARCINILOR	37
1.9. ENERGIA FERMI	41
1.10. FENOMENE DE TRANSPORT	44
1.11. GENERAREA ȘI RECOMBINAREA	54
PROBLEME LA CAPITOLUL I	61
II. JONȚIUNI SEMICONDUCTOARE	89
2.1. JONȚIUNEA P-N	89
2.2. POLARIZAREA P-N JONȚIUNII	91
2.3. CAPACITATEA P-N JONȚIUNII	95
2.4. MODELE LINIARE PENTRU P-N DIODA	102
2.5. STRĂPUNGerea P-N JONȚIUNII	108
2.6. JONȚIUNEA METAL – SEMICONDUCTOR	116
2.7. CONTACTUL DINTRE SEMICONDUCTORI IZOTIPI	126
2.8. HETEROJONȚIUNI	127
PROBLEME LA CAPITOLUL II	132
III. DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE BITERMINALE	153
3.1. DIODA P-N	153
3.2. VARICAPUL	162
3.3. STABILITRONUL. STABISTORUL	168
3.4. DIODA CU CURENT CONSTANT	175
3.5. DIODA TUNEL	177
3.6. DIODA TUNEL REVERS	186
3.7. DIODA DE IMPULS	188
3.8. DIODA SCHOTTKY	191
3.9. DIODA CU ACUMULARE DE SARCINĂ	197

3.10. DIODA P-I-N	199
3.11. DIODA GUNN	203
3.12. DIODE CU AVALANȘĂ DE TIMP DE TRANZIT	208
3.13. DIODA CU BAZA DUBLĂ	217
PROBLEME LA CAPITOLUL III	223
IV. HOMOSTRUCTURI COMUTATOARE	
MULTIJONȚIUNE	232
4.1 DIODA SHOCKLEY	232
4.2 DIACUL	236
4.3 TIRISTORUL SCR	240
4.4 TRIACUL	251
4.5 TIRISTORUL CU BLOCARE PE POARTĂ	254
4.6 COMUTATORUL CONTROLAT CU SILICIU	259
4.7 TIRISTORUL CONVENȚIONAL ASIMETRIC	260
4.8 TIRISTORUL CU CONDUȚIE INVERSĂ	261
PROBLEME LA CAPITOLUL IV	263
V. TRANZISTOARE BIPOLARE	264
5.1. TRANZISTOARE BIPOLARE HOMOJONȚIUNE	266
5.2. REGIMUL DE LUCRU. MODELUL CUADRIPOL	274
5.3. FAMILIA DE CARACTERISTICI STATICE	283
5.4. REGIMUL DINAMIC AL TRANZISTOARELOR BIPOLARE	288
5.5. TRANZISTOARE COMPLEMENTARE	291
5.6. TRANZISTOARE HETEROBIPOLARE	294
PROBLEME LA CAPITOLUL V	297
VI. TRANZISTOARE CU EFECT DE CAMP	309
6.1. TRANZISTOARE UNIPOLARE CU POARTA JONȚIUNE	310
6.2. TEC MOS CU CANAL INDUS	319
6.3. TEC MOS CU CANAL INITIAL	328
6.4. TRANZISTOARE BIPOLARE CU POARTA IZOLATĂ	331
6.5. ANALIZA COMPARATIVĂ A TRANZISTOARELOR	340
PROBLEME LA CAPITOLUL VI	345

VII. DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE	348
7.1. FOTODETECTOARE	350
7.2. FOTOCONDUCTIVITATEA	357
7.3. FOTODIODE CU P-N JONȚIUNE	360
7.4. FOTODIODE P-I-N	368
7.5. FOTODIODE CU AVALANȘĂ	381
7.6. FOTODIODE SCHOTTKY	386
7.7. VARACTORE VARIABLE OPTIC	390
7.8. FOTOTRANZISTOARE HOMO- ȘI HETEROJONȚIUNE	393
7.9. FOTOTRANZISTOARE DARLINGTON	401
7.10. OPTOCUPLOARE. OPTOIZOLATOARE	402
7.11. FOTOTIRISTOARE	408
7.12. FOTOTRANZISTOARE CU EFECT DE CÂMP	409
7.13. DIODE ELECTROLUMINISCENTE	414
7.14. DIODE LASER	424
7.15. TRANZISTOARE ELECTROLUMINISCENTE TRANZISTOARE LASER	430
7.16. DISPOZITIVE PIEZOFOTONICE ȘI PIEZOFOTOTRONICE	432
7.17. DISPOZITIVE CU CUPLAJ DE SARCINĂ	437
7.18. APLICAȚIILE EFECTULUI HALL, FOTO-HALL PROBLEME LA CAPITOLUL VII	444 450
VIII. ALTE DISPOZITIVE	454
8.1. DISPOZITIVE HALL	454
8.2. DETECTOARE SEMICONDUCTOARE DE RADIAȚII	459
IX. LIMITELE MICROELECTRONICII	471
9.1 REFLECȚII ASUPRA EFECTELOR LIMITATOARE	471
ANEXE	476
BIBLIOGRAFIA	482

CUVÂNT ÎNAINTE

Avalanșa de noi dispozitive microoptoelectronice elaborate în laboratoare, ajung în spectru relativ mic în producere în serii, dovedind prin aceasta utilitatea și performanțele. Evoluând, dispozitivele trebuie aduse la cunoștință generației noi de ingineri. Universitatea Tehnică din Moldova are o istorie unică în ingineria microelectronicii de pe acest plai începând din 1967, când a fost fondată Facultatea de Electrofizică, care a inițiat pregătirea inginerilor la specialitatea Dispozitive Semiconductoare, ulterior Microelectronica și Nanotehnologii. Acest fapt a constituit și unul din pilonii inițierii și dezvoltării industriei microelectronicii bazate pe Si în Chișinău (Uzina Mezon cu producerea anuală de cca 130 mln CI).

Manualele, notele de curs sunt scrise și editate pentru că autorii au considerat că nu există alte cărți care să spună ceea ce simțeau ei personal, că trebuie spus în felul în care voiau să o spună ei. Dat fiind lipsa unui manual al UTM în domeniu, am considerat că este necesar de un astfel de manual, care, de rând cu familiarizarea proceselor fizice din semiconductoare să conțină și aplicarea mijloc de aplicare a cunoștințelor prin rezolvarea unor probleme tematice.

Generațiile premergătoare a inginerilor din domeniul microelectronicii obțineau cunoștințe vaste în fizica corpului solid și dispozitivelor electronice existate în acea perioadă. Necesitatea de noi specialități interdisciplinare, cum ar fi ingineria biomedicală, fizica medical, ingineria clinică condus la micșorarea numărului de ore alocate disciplinelor din ingineria microelectronicii. Din aceste considerente este necesar de identificat volumul optim al disciplinelor specializate predate la universități tehnice pentru ingineri cu cunoștințe interdisciplinare.

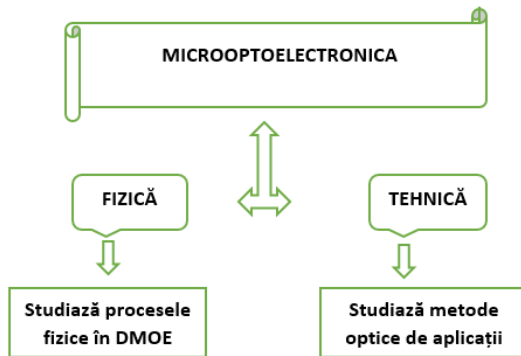
Această carte este încercarea noastră de a umple acest vid. Textul manualului prezentat este „diferit” atât pentru ceea ce nu include, cât și pentru ceea ce include, iar această unicitate va iniția obligatoriu unele discuții.

În primul rând, acest text acoperă o serie de subiecte de la fizica semiconductorilor la dispozitive pe baza lor. În al doilea rând, dacă înveți ceva despre semiconductori pentru microoptoelectronică cu siguranță veți câștiga aplicând elementele proceselor fizice în dispozitive la rezolvarea unor probleme de complexitate cel mult medie, prezentate în manual.

Textul prezentat nu încearcă să fie cuvântul final pe niciunul dintre subiecte la care se adresează. Prezintă o tentativă de tratament corect și oferă un nivel funcțional de cunoștințe, dar este, de asemenea, pregătirea pentru un al doilea nivel de specializare în fizica corpului solid, dispozitivelor pe baza lor, care cu siguranță trebuie să urmeze dacă cei interesați decid.

Textul conține mai mult material decât poate fi acoperit prin numărul de ore alocate la disciplina Dispozitive Microoptoelectronice, astfel cadrul didactic nu va utiliza toate din acest material și nici nu trebuie să-l folosească în ordinea în care apare în cuprins.

Un specialist în ingineria tehnicii electronice trebuie să aibă cunoștințe în microoptoelectronica, care are aplicații în practicile tuturor domeniilor vieții.



Direcții de studii a dispozitivelor micro-optoelectronice

Marea majoritate a dispozitivelor microoptoelectronice sunt confecționate în prezent pe baza semiconductorilor. Din aceste considerente curriculara disciplinei "Dispozitive microoptoelectronice" acordă atenție sporită studiului proceselor fizice de bază care stau la baza funcționării, dar și metodelor optime de aplicare a lor.

Fiind familiarizați cu acest curs succint, licențiații în inginerie vor avea un orizont suficient de cunoștințe pentru a se orienta în cum lucrează un dispozitiv microoptoelectronic, unde și cum poate fi aplicat în practică.

Compendiul cu problemele propuse este util pentru studenții specialităților Microelectronica, Ingineria Biomedicală, precum și pentru oricare care este interesat de acest domeniu.

FOREWORD

The avalanche of new microoptoelectronic devices developed in laboratories, reach a relatively small spectrum in series production, thus proving its usefulness and performance. As it evolves, devices must be introduced to the new generation of engineers. The Technical University of Moldova has a unique history in microelectronics engineering in this area since 1966, when the Faculty of Electrophysics was founded, which initiated the training of engineers in the specialties of Semiconductor Devices, Microelectronics and Nanotechnologies. This fact was also one of the pillars of the initiation and development of the Si-based microelectronics industry in Chisinau (Mezon Plant with an annual production of about 130 million IC).

The manual, the course notes are written and edited because the authors considered that there are no other books that say what they felt personally, that it must be said in the way they wanted to say it. Given the lack of a manual of TUM in the field, we considered it necessary for such a manual, which, along with familiarization with physical processes in semiconductors, should also contain the application of knowledge by solving thematic problems.

Previous generations of microelectronics engineers gained extensive knowledge of solid body physics and electronic devices that existed at the time. The need for new interdisciplinary specialties, such as biomedical engineering, medical physics, clinical engineering led to a reduction in the number of hours allocated to the disciplines of microelectronics engineering. For these reasons it is necessary to identify the optimal volume of specialized disciplines taught at technical universities for engineers with interdisciplinary knowledge.

This book is our attempt to fill this void. The text of the textbook presented is "different" both for what it does not include and for what it includes, and this uniqueness will necessarily initiate some discussions.

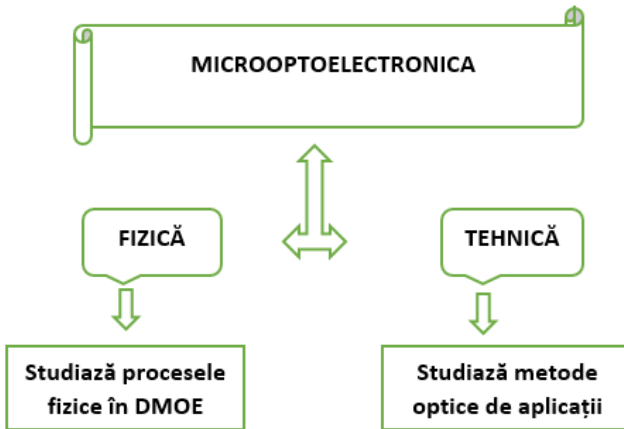
First, this text covers a range of topics from semiconductor physics to devices based on them. Secondly, if you learn something about semiconductors for microoptoelectronics you will definitely win by applying the elements of physical processes in devices to solve problems of maximum complexity, presented in the manual.

The presented text does not try to be the final word on any of the topics it addresses. It presents an attempts at correct treatment and provides a functional level of knowledge, but it is also preparing for a second level of

specialization in solid body physics, devices based on them, which certainly must follow if those interested decide.

The text contains more material than can be covered by the number of hours allocated to the discipline Microoptoelectronic Devices, so the teacher will not use all of this material and should not use it in the order in which it appears in the table of contents.

An electronic engineering specialist must have knowledge in microoptoelectronics, which has applications in the practices of all areas of life.



Study directions of micro-optoelectronic devices

The vast majority of microoptoelectronic devices are currently made from semiconductors. For these reasons, the curriculum of the discipline “Microoptoelectronic devices” pays more attention to the study of the basic physical processes that underlie the operation, but also to the optimal methods of their application.

Being familiar with this brief course, engineering graduates will have a sufficient knowledge horizon to orient themselves in how a microoptoelectronic device works, where and how it can be applied in practice.

The compendium with the proposed problems is useful for students of Microelectronics, Biomedical Engineering, as well as for anyone who is interested in this field.

BIBLIOGRAFIA

(în ordine alfabetică)

1. Canțer V., Nicolaescu I.I. Tighineanu I. . Fizica corpului solid. Vol 2, 3, Chișinău , 1991, 264 p./ 206 p.
2. Dan Sachelarie, Gabriel Predușca, Henri-George Coandă. Probleme fundamentale de microelectronică, Matrix Rom, București, 2004
3. Robert W. Dutton and Chang-Hoon Choi. Implications of gate tunneling and quantum effects on compact modeling in the gate-channel stack. http://www-tcad.stanford.edu/tcad/pubs/device/msm_choi.pdf
4. Dispozitive și circuite electronice. Probleme. Ed. Didactică și pedagogică, București 1982. D. Dascalu ș.a.
5. E.Fred Schubert Light Emitting Diodes, 2nd Ed. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InP/>
6. P.Gașin, P.Gaugaș, A.Focșa. Fizica dispozitivelor semiconductoare, Tipografia Centrală, Chișinău, 1998
7. O. Gunawan, et al., Carrier-resolved photo-Hall effect, Nature 575, 151 (2019). <https://koreauiniv.pure.elsevier.com/en/publications/carrier-resolved-photo-hall-effect>
8. Handbook Series on Semiconductor Parameters, Volume 1: Si, Ge, C (Diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
9. <https://doi.org/10.1142/2046> | November 1996, Pages: 452, Edited By: M Levinshtein, S Rumyantsev, M Shur.
10. E.V.Lavrov. Problems and Solutions to Physics of Semiconductor Devices. <https://vdocuments.mx/problems-and-solutions-to-physics-of-semiconductor-devices.html>
11. Ion Munteanu, Fizica Solidului, Ed. Universității din București, București, 2003, 722 p.
12. Introducere în fizica corpului solid. Traducere din engleză. Charles Kittel. Editura Tehnica. 1972, 806 p.
13. Neamen D/A/ Semiconductors Physics and Devices: Basic principles, Homewood? IL Irwin? 1992/
14. Phototronics. Microtechnology and MEMS, DOI, 10.1007/978-3-642-34237-0_1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
15. Principles of Semiconductor Devices, by Bart Van Zeghbroeck, 2011, <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/>
16. M.Rizzi, M.D'Aloia, B. Castanoglo. Semiconductor Detectors and Principles of Radiation/matter Interaction. J. of Appl. Sciences, 10 (23), 3141-3155, 2010. <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/jas/2010/3141-3155.pdf>

17. Sursa: A. Asenov, J. R. Watling A. R. Brown, D. K. Ferry, "The use of Quantum Potential for Confinement and Tunnelling in Semiconductor devices", *Journal of Computational Electronics*, 1:503-513 2002
18. Sah C.T. *Fundamental of Solid State Electronics*, World Scientific, 1991, 1011 p.
19. Y.P.Varshni, Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors. *Physica*, v. 34, Issue 1, 1967, p.p. 149-164.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031891467900626>
20. Z.L.Wang, Piezophotonics and Piezophotonics
https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html
21. Аркуша Ю.В., Белецкий Н.И., Прохоров Э.Д. Задачи по твердотельной электронике. Учебн. пособие. Харьков. ХНУ, 2004, 144 с.
22. Г.И. Базир, Физические основы микроэлектроники, Ульяновск, УлГТУ, 2006, 115 с. <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2006/73.pdf>
23. А.И.Белоус, С.А.Ефименко, А.С.Турцевич. Полупроводниковая силовая электроника. М., Техносфера, 2013, 216 с.
24. В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, И.В.Карпенко, А.Г.Миронов. Сборник задач по физике полупроводников, М., Наука, Гл. ред. физ-мат. лит. 1987, 144 с.
25. Н.В.Бурбаева, Т.С.Днепровская. Основы полупроводниковой электроники. М., ФИЗМАТЛИТ, 2012. 312 с.
26. Н.В.Бурбаева, Т.С.Днепровская. Сборник задач по полупроводниковой электронике. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004. 168 с
27. Д. В. Величко, В. Г. Рубанов, Полупроводниковые приборы и устройства, Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2006. –
28. В.А.Гуртов. Твердотельная электроника. Учебное пособие. Издание второе исправленное и дополненное. М., 2005. 492 с.
29. Егоров М.Н. Электроника. Конспект лекций. /Электронный ресурс/. Красноярск, ИПК СФУ, 2008
30. Киреев В.Ф. Физика полупроводников, Высшая школа, 1969, 590 с.
31. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008, 488 с.
32. В. Ф. Попов Физические основы микроэлектроники, Тамбов, Изд. ТГТУ 2001. <http://window.edu.ru/resource/761/21761/files/popov2.pdf>.
33. В.И.Старосельский. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники, ЮРАЙТ, Москва, Высшее образование, 2009, 463 с.
34. https://file004.ru/jk9fsg7fsghajj8ggshjuuisaoss7adsdh.Fizikapoluprovodnikovyhpriborovmikr_pdf.rar.html

35. Федотов Я.Л. Основы физики полупроводниковых приборов. Изд. 2-еб М., Советское Радио, 1969. 592 с.
36. Физический энциклопедический словарь. Гд. Ред. А.М.Прохоров. М., Советская энциклопедия, 1984, 944 с.
37. Шалимова К.В. Физика полупроводников, М., Энергия, 1976, 416 с.
38. А.Г.Захаров, Ю.Б.Какурин, Н.А.Филипенко. Сборник задач по дисциплине Физические основы микроэлектроники. Таганрог, Изд. ТРТУ, 2005, 91 с.
39. Зебрев Г.И. Сборник задач по курсу «Основы микроэлектроники» Ред. Н.В. Шумакова, МИФИ. Типография МИФИ. 2003.
40. С.Зи, Физика полупроводниковых приборов, в 2-х кн., книга 2-я, М., 1984, 456 с.
41. https://www.cree.com/led-components/media/documents/LED_color_mixing.pdf
42. <http://www.ystech.com/digital-microscope-CCD-camera-info.html>
43. <http://cctvsystemblog.blogspot.com/2013/07/electron-multiplying-charge-coupled.html>
44. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
45. http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/9039/pp_pribor.pdf
46. <http://1.bp.blogspot.com/-wPohyyammoY/VDcZVD-AWZI/AAAAAAAAAXc/TiRCPs3j4CQ/s1600/Feng-Laser1.jpg>
47. <https://tse4.mm.bing.net/th?id=OIP.YMiCG6WYQA4tkCBZTavVuAHaEU&pid=Api&P=0&w=258&h=151>
48. <https://i.pinimg.com/originals/07/6d/f7/076df79f6afb1d7cbbf1ccc007ef8603.jpg>
49. <https://www.microscopyu.com/digital-imaging/introduction-to-charge-coupled-devices-ccds>
50. <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/images/quantumefficiencyfigure1.jpg>
51. https://energy.gov/sites/prod/files/styles/media_energy_gov_wysiwyg_fullwidth/public/led-50.basics_white_light_0615.jpg?itok=vfhOmT4lhttps://www.britannica.com/science/semiconductor
52. <https://ecee.colorado.edu/~bart/book/eband5.htm>
53. <https://globalsmt.net/wp-content/uploads/2019/10/hall-4-.png>
54. https://www.researchgate.net/profile/Ok_Gunawan/publication/316006953/figure/fig3/AS:557799106592768@1510001078268/The-camelback-field-confinement-effect-in-a-parallel-dipole-line-system_Q320.jpg