

Dejan M. Gvozdić

**OSNOVI
FIZIČKE
ELEKTRONIKE**

Akademski misao
Beograd 2017.

Dejan M. Gvozdić

OSNOVI FIZIČKE ELEKTRONIKE

Recenzenti

Dr Jovan Radunović

Dr Antonije Đorđević

Dr Lazar Saranovac

Na sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta održanoj 13.12.2016.
ova knjiga je odobrena kao udžbenik na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Izdaje i štampa

Akademski misao, Beograd

Tiraž

50 primeraka

ISBN 978-86-7466-659-3

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima nije dozvoljeno bez izričite saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

Predgovor

Tekst knjige koju čitalac ima pred sobom predstavlja uvod u oblast fizike poluprovodnika i poluprovodničkih elektronskih i optoelektronskih naprava, koje u ovom trenutku čine fundament hardvera savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija. Praktično sve visokotehnološke inovacije koje su danas dostupne čovečanstvu, u svojoj osnovi, u većoj ili manjoj meri, sadrže poluprovodničke komponente o kojima će biti reči u knjizi.

Cilj knjige je da upozna čitaoca sa fizičkim modelom, a zatim i sa električnim i drugim svojstvima poluprovodnika koji proizilaze iz ovog modela. Pored toga, knjiga ima za cilj da omogući čitaocu da, polazeći od modela poluprovodnika, kvalitativno razume način funkcionisanja postojećih poluprovodničkih elektronskih naprava, a zatim i usvoji matematičko-fizičke modele, pomoću kojih je moguće modelovati, analizirati i projektovati same komponente, ali i odgovarajuća elektronska kola, nastala njihovom integracijom. Poslednji, ali verovatno i najvažniji i najdugoročniji cilj knjige je usvajanje principa, paradigmi, metodologije i alata specifičnih za oblast fizičke elektronike, koji potencijalno mogu biti implementirani u budućim poluprovodničkim ili nekim drugim tehnologijama, koje budu zamenile poluprovodničke.

Knjiga je u osnovi zamišljena kao udžbenik za studente III semestra osnovnih studija, koji na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, u okviru studijskog programa Elektrotehnika i računarstvo, prate kurs pod nazivom Osnovi fizičke elektronike. Sadržaj udžbenika bi trebalo da bude najkorisniji studentima Odseka za fizičku elektroniku, budući da se materija, koja se u ovoj knjizi izlaže na osnovnom nivou, tretira šire i dublje u predmetima koji se sreću na višim godinama studija ovog odseka. Sa druge strane, imajući u vidu da poluprovodničke tehnologije leže u osnovi hardvera informacionih i telekomunikacionih tehnologija, knjiga može biti od koristi studentima Odseka za elektroniku i Odseka za telekomunikacije. Poluprovodničke naprave, pre svega one optoelektronske, često se koriste za realizaciju senzora u različitim tehnološkim procesima ili u sistemima za formiranje i obradu slike, zbog čega su vrlo interesantne i sa aspekta automatizacije i robotike. U tom smislu, poznavanje

rada ovih komponenata može biti interesantno i studentima Odseka za signale i sisteme. Konačno, imajući u vidu da se poluprovodničke komponente odavno primenjuju u kontroli rada električnih mašina, a od skoro i u realizaciji obnovljivih i ekoloških izvora energije i osvetljenja, knjiga može biti interesantna i studentima Odseka za energetiku. Izvesno je da pripremljeni materijal može biti koristan onim studentima master i doktorskih studija, koji su iz bilo kog razloga tokom svog obrazovanja propustili da steknu osnovna znanja iz ove oblasti, a koji, pored toga, smatraju da bi im poznavanje materije izložene u knjizi pomoglo da uspešnije prate nastavu i razumeju gradivo na višem nivou studija. U tom smislu, udžbenik može poslužiti kao pomoćna literatura onima koji su dobro upoznati sa problematikom ili se njome profesionalno bave.

Materija izložena u udžbeniku, iako bazična sa aspekta fizičke elektronike, sadrži veliki broj novih pojmova i paradigmi, od kojih je većina prilično apstraktna. Iz tog razloga, savlađivanje materije traži određen stepen strpljenja i upornosti od strane čitalaca. Pored toga, problematika koju knjiga razmatra je multidisciplinarna i oslanja se na znanja stečena na prvoj godini studija studijskog programa Elektrotehnika i računarstvo, i to kroz kurseve Fizike, Osnova elektrotehnike i Matematike. U tom smislu, očekuje se da čitalac ima određena predznanja, koja može operativno da koristi u cilju praćenja, izvođenja, tumačenja i usvajanja prikazane materije. Prvi deo udžbenika koji je posvećen poluprovodnicima, u osnovi zahteva poznavanje i primenu zakona mikrosveta i mnoštva, odnosno talasne kvantne mehanike i statističke fizike. Međutim, u okviru ovog dela knjige, uložen je napor od strane autora da se izbegne previše duboko zalaženje u ove teorijske discipline i da se kompletno poglavlje bazira na znanjima stečenim u okviru kurseva fizike na prvoj godini studija. Ipak, u cilju kompletnosti izlaganja, a imajući u vidu posebno zainteresovane čitaoce, detalji pojedinih izvođenja su prikazani i obeleženi u tekstu oznakom \oplus .

U nastojanju da udžbenik učini konzistentnijim, autor je posebnu pažnju posvetio tome da, što je više moguće, usaglasi terminologiju i označavanje sa već postojećim udžbenicima sa kojim su se studenti upoznali tokom prve godine studija. Međutim, multidisciplinarnost izložene materije, a samim tim i veći broj fizičkih veličina koje su od interesa, uslovlila je da se za pojedine fizičke veličine koriste drugačije oznake od onih koje su standardno korišćene u okviru kurseva na prvoj godini studija. Primera radi, za napon i elektrostatički potencijal, u ovom udžbeniku se koriste oznake V i Φ , dok se energija i kvantno-mehanički potencijal označavaju sa E i U , respektivno.

Osnovu za ovaj udžbenik čine materijali koji su pripremljeni pre više godina i koji su u formi beleški sa predavanja bili dostupni studentima. Zahvaljujući komentarima i sugestijama studenata, došlo se do spoznaje kako doraditi i učiniti pristupačnim one delove materije, koja je sa aspekta razumevanja bila

najzahtevnija. Uz pomoć dugogodišnjeg saradnika na predmetu, doc. dr Jasne Crnjanski, uložen je dodatni napor da se materijal poboljša, pročisti i dovede na nivo univerzitetskog udžbenika. Osnovni koncept kursa, na koji se odnosi ovaj udžbenik, formiran je još 2003. godine, od strane prof. dr Jovana Radunovića, koji je i jedan od recenzenata ove knjige i kome autor, u tom smislu, duguje posebnu zahvalnost. Takođe, autor se zahvaljuje i ostalim recenzentima, prof. dr Antoniju Đorđeviću i prof. dr Lazaru Saranovcu, koji su svojim kritikama, komentarima i sugestijama pomogli da udžbenik bude podržan od strane Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Izvesno je da prostor za dalje unapređenje i poboljšanje svakog, pa i ovog, udžbenika postoji. Upravo zbog toga, a u meri u kojoj je to moguće, biće investiran napor od strane autora, da se sve kritike, komentari i sugestije uzmu u obzir i iskoriste u cilju realizacije novog izdanja u kome će biti uklonjeni postojeći nedostaci.

Beograd, novembra 2016. godine,

Autor

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Osnovi fizike poluprovodnika	15
2.1	Model poluprovodnika – kristalna struktura materije	16
2.1.1	Kroni-Penijev model	18
2.1.2	Određivanje zavisnosti energije od talasnog vektora	23
2.1.3	Gustina struje šupljina	28
2.1.4	Brzina i ubrzanje elektrona u poluprovodniku	30
2.2	Gustina kvantnih stanja	31
2.3	Statistička raspodela nosilaca naelektrisanja	37
2.3.1	Kvantna ravnotežna statistička fizika	38
2.3.2	Fermi-Dirakova raspodela	40
2.4	Poluprovodnik u termodinamičkoj ravnoteži	42
2.4.1	Kvantizacija energije elektrona u atomu	43
2.4.2	Primer elektronske strukture atoma: silicijum	44
2.4.3	Tipovi veza u čvrstim telima	46
2.4.4	Besprimesni poluprovodnik	47
2.4.5	Primesni poluprovodnik	56
2.4.6	Fermijev nivo u poluprovodnicima	57

- 2.5 *Poluprovodnik u neravnoteži* 66
 - 2.5.1 *Gustina struje drifta* 66
 - 2.5.2 *Gustina struje difuzije* 71
 - 2.5.3 *Gustina struje difuzije i drifta* 72
 - 2.5.4 *Rekombinaciono-generacioni procesi* 73
 - 2.5.5 *Jednačina kontinuiteta* 76
 - 2.5.6 *Ambipolarni transport* 78
 - 2.5.7 *Nehomogeni poluprovodnik* 80

- 3 *PN spoj* 87
 - 3.1 *PN spoj u termodinamičkoj ravnoteži* 87
 - 3.1.1 *Aproksimacija totalnog osiromašenja* 90
 - 3.1.2 *Raspodela električnog polja i potencijala u pn spoju* 91
 - 3.1.3 *Zonski profil pn spoja u termodinamičkoj ravnoteži* 94
 - 3.2 *PN spoj van termodinamičke ravnoteže* 97
 - 3.2.1 *Kvalitativna analiza polarisanog pn spoja* 98
 - 3.2.2 *Strujno-naponska karakteristika idealnog pn spoja* 103
 - 3.2.3 *Kvazi-Fermijevi nivoi u polarisanom pn spoju* 109
 - 3.3 *Kapacitivnost pn spoja* 111
 - 3.3.1 *Kapacitivnost oblasti prostornog tovara* 111
 - 3.3.2 *Difuzionna kapacitivnost* 113

- 4 *Proboj pn spoja* 115
 - 4.1 *Zenerov proboj* 116
 - 4.2 *Lavinski proboj* 118
 - 4.3 *Ispravljачke karakteristike pn spoja* 120

- 5 *Prelazni režimi rada pn spoja* 123
 - 5.1 *Prelazni režim iz direktne u inverznu polarizaciju* 123
 - 5.1.1 *Vremenska varijacija akumuliranog naelektrisanja* 127

- 5.2 *Prelazni režim iz inverzne u direktnu polarizaciju* 132
- 6 *Spoj metal-poluprovodnik* 135
 - 6.1 *Šotkijev efekat* 135
 - 6.2 *Šotkijeva barijera* 138
 - 6.3 *Strujno-naponska karakteristika ms spoja* 141
 - 6.4 *Omski kontakt* 144
- 7 *Heterostrukturni spoj* 147
 - 7.1 *Zonski dijagram heterostrukturnog spoja u TDR* 148
 - 7.2 *Polarizacija heterostrukturnog spoja* 154
- 8 *Struktura metal-oksid-poluprovodnik* 157
 - 8.1 *Idealna MOS struktura* 157
 - 8.2 *Zonski dijagram MOS strukture* 158
 - 8.3 *Kapacitivnost MOS kondenzatora* 168
- 9 *PN spoj u optoelektronskim komponentama* 171
 - 9.1 *Apsorpcija i emisija svetlosti* 174
 - 9.2 *Optički predajnici* 176
 - 9.2.1 *Poluprovodnički laser* 176
 - 9.2.2 *Svetleće diode* 181
 - 9.3 *Optički prijemnici* 183
 - 9.3.1 *Fotodetektor* 183
 - 9.3.2 *Solarne ćelije* 196
- 10 *Tranzistori sa efektom polja* 201
 - 10.1 *Spojni tranzistor sa efektom polja* 203
 - 10.1.1 *Kvalitativna teorija rada JFETa* 204
 - 10.1.2 *Strujno-naponska karakteristika JFETa* 207

10.2	<i>Metal-poluprovodnik tranzistor sa efektom polja</i>	213
10.3	<i>MOS tranzistor sa efektom polja</i>	213
10.3.1	<i>Kvalitativna teorija MOSFETA</i>	213
10.3.2	<i>Strujno-naponska karakteristika MOSFETA</i>	215
10.3.3	<i>Ekvivalentna šema MOSFETA za male signale</i>	219
11	<i>Bipolarni tranzistori</i>	221
11.1	<i>Struktura bipolarnog tranzistora</i>	221
11.2	<i>Kvalitativna analiza rada bipolarnog tranzistora</i>	222
11.2.1	<i>Komponente struje u bipolarnom tranzistoru</i>	223
11.2.2	<i>Parametri performansi u bipolarnom tranzistoru</i>	225
11.3	<i>Statička karakteristika tranzistora u aktivnom režimu</i>	228
11.3.1	<i>Statička karakteristika tranzistora sa kratkom bazom</i>	233
11.4	<i>Režimi rada pnp bipolarnog tranzistora</i>	240
11.4.1	<i>Direktni aktivni režim</i>	240
11.4.2	<i>Inverzni aktivni režim</i>	241
11.4.3	<i>Režim zakočenja</i>	242
11.4.4	<i>Režim zasićenja</i>	242
11.5	<i>Ebers-Molov model bipolarnog tranzistora</i>	242
11.6	<i>Hibridni-π model bipolarnog tranzistora</i>	245
	<i>Literatura</i>	247
	<i>Indeks</i>	249

1 *Uvod*

Potencijal informaciono-komunikacionih tehnologija da omoguće prevazilaženje barijera u komunikaciji u pogledu vremena, rastojanja i lokacije, kao i ograničenja vezanih za ljudsku sposobnost u obradi informacija i donošenju odluka, uslovio je njihovo prodiranje u gotovo sve aspekte života savremenih ljudi, na svim nivoima ljudskog organizovanja, uključujući uže i šire društvene zajednice, pa i samo čovečanstvo. Sve to, dovelo je do jedne nove socio-ekonomske i istorijske epohe, koja se uopšteno naziva informaciono-komunikacionom erom. U osnovi, informaciono-komunikaciona era počiva na činjenici da savremena digitalna industrija dovodi do stvaranja društva zasnovanog na znanju, koje je podržano i okruženo visokotehnološkom globalnom ekonomijom, a koja, s druge strane, obezbeđuje da proizvodnja i servisni sektor funkcionišu na najefikasniji mogući način. U skupu tehnologija koje su bile presudne za uspostavljanje informaciono-komunikacione ere kakvu danas poznajemo, izdvaja se sledećih osam oblasti: (1) poluprovodničke tehnologije; (2) računarske tehnologije; (3) optičke komunikacije; (4) mobilne komunikacije; (5) satelitske tehnologije; (6) mrežne tehnologije; (7) napredna humano-računarska interakcija i (8) digitalna transmisija i kompresija podataka.

Naučno-tehnološki proboj na polju poluprovodničkih tehnologija, u većoj ili manjoj meri, uticao je i na ostale ključne oblasti informaciono-komunikacionog doba. Taj uticaj je skoro u potpunosti realan i opipljiv, budući da su poluprovodničke tehnologije uglavnom služile kao fizičko-materijalna platforma za realizaciju ostalih tehnologija, i to kroz implementaciju poluprovodničkih integrisanih kola, koja se najčešće definišu i opisuju kao hardver. Ključni doprinos poluprovodničkih integrisanih kola proističe iz sveopšte minijaturizacije tehnoloških rešenja i ekstremne efikasnosti u čuvanju, obradi i prosleđivanju informacija. U ovom trenutku je jako teško pronaći visokotehnološki proizvod koji se bazira na nečem što nije vezano za poluprovodnički hardver. U kojoj meri je ovo tačno, može se videti ako se navedu samo neki od proizvoda iz svakodnevnog života koji sadrže poluprovodnička integrisana kola: super-moćni desktop računari, konzole za video igre, obični i monitori osetljivi na dodir,

tableti, mobilni telefoni i bazne stanice, serveri, ruteri, mrežna oprema i set-top boksovi, standardna televizija i televizija visoke rezolucije, fotoaparati i kamere, kuhinjski aparati, rashladna tehnika, električna brojila, industrijske električne mašine i postrojenja, industrija električnih, hibridnih i klasičnih automobila itd. Iako to, u neku ruku, spada u domen nagađanja, pojedine analize ukazuju na to da su pojavom i upotrebom poluprovodničkih elektronskih kola u posljednjih 30 godina informaciono-komunikacione tehnologije (ICT) doživele takvu ekspanziju, za koju bi, bez njihove primene, bilo potrebno stotinu, pa i više stotina godina.

U osnovi poluprovodničkih integrisanih kola leže elektronski elementi, tzv. tranzistori. Osim što su u stanju da vrše kontrolu protoka električne struje, ove naprave poseduju i sposobnost promene osobina električnih signala, prvenstvo napona i struja. Nakon što je po prvi put realizovan kao diskretna komponenta u Belovim laboratorijama 1947. od strane Šoklija, Bretejna i Berdina, tranzistor je u roku od nešto više od 10 godina započeo svoj put integrisane komponente. Naime, sredinom 1958. godine, dva pionira poluprovodničke industrije, Džek Kilbi (Teksas Instruments) i Robert Nojsi (Ferčajld Semikondaktor i kasnije jedan od osnivača Intela) realizovali su prototip poluprovodničkog integrisanog kola i definisali fundamentalne ideje i procese koje je potrebno preduzeti da bi se izvršila integracija većeg broja elektronskih naprava i električnih kola na jednom komadu poluprovodničkog kristala, tzv. čipu. Sredinom sedamdesetih godina tehnologija poluprovodničke integracije doživela je nagli razvoj, budući da je ustanovljeno da se tranzistor uspešno može koristiti za realizaciju računara, ne samo kao logički element, već i kao memorijska jedinica. Pokazalo se da performanse računara dominantno zavise od broja tranzistora koji su iskorišćeni u realizaciji njihovog procesora i memorije. Konkretno, 1980. godine, integrisana kola su sadržavala oko desetak hiljada tranzistora, a već 1994. nekoliko stotina miliona. U toku ovih 15 godina količina računarske memorije rasla je sa faktorom 4 svake 3 godine. Istovremeno, sa porastom broja tranzistora smanjivala se cena proizvodnje jednog tranzistora. Danas se, na jednom čipu, rutinski integriše nekoliko milijardi tranzistora ili nekih drugih naprava, što govori da je porast broja naprava na čipu u suštini imao eksponencijalni karakter.

Pokazalo se da je industrija poluprovodnika poslednjih 50 godina „marširala“ u ritmu jednog predviđanja, koje je još 1965. dao Gordon Mur, jedan od osnivača današnjeg Intela. To predviđanje ticalo se rasta broja tranzistora na čipu za period od deset godina. Ovo predviđanje je vremenom preraslo u tzv. Murov zakon, koji je suštinski imao tehnološko-ekonomski karakter i kojeg su se pridržavale kompanije iz domena industrije poluprovodnika. Murov zakon je incijalno predviđao da će se broj tranzistora na mikroprocesorskom

čipu udvostručavati svake godine, a kasnije je to tvrđenje preinačeno i umesto jedne godine prošireno je na vremenski okvir od 18 meseci do dve godine. Ovo vremensko proširenje ticalo se činjenice da se osim broja tranzistora, iz generacije u generaciju povećava njihova brzina, a samim tim i performanse čipa. Eksponencijalno unapređenje mikroprocesora dovelo je do toga da se nezgrapni računari iz sedamdesetih pretvore u sofisticirane personalne računare iz osamdesetih i devedesetih godina prošlog veka, a odatle u globalnu računarsku mrežu, pod dobro poznatim nazivom Internet. Ovaj rezultat je po svoj prilici bio neizbežan. Naime, proizvođači čipova su se praktično namerno držali Murovog zakona, jer su na svakom novom nivou, proizvođači softvera razvijali aplikacije koje su išle do granica izdržljivosti postojećih čipova i sve to nudili potrošačima, koji su sa druge strane tražili sve više i više od svojih personalnih uređaja. U skladu sa zakonima tržišta, ovim su stvoreni uslovi za samoodrživi ciklus, podržan pozitivnom povratnom spregom, koji je forsirao proizvođače čipova da što je pre moguće tržištu ponude još bolje performanse mikroprocesora. Sa druge strane, svaki ciklus je dovodio do velikog obrta kapitala koji je omogućavao poluprovodničkoj industriji dobru zaradu i nove investicije, pre svega u novu i skuplju fotolitografsku tehniku i sve delikatniju opremu i istraživanje. Međutim, brzina događaja dovela je do zastoja, jer je proces proizvodnje postao komplikovan i doveo do velikog broja faza i koraka, a uz to uključio još veći broj dobavljača opreme i aparatura. Da bi se održala koordinacija između velikog broja proizvođača i dobavljača, od 1990. godine, na svake dve godine, ključne kompanije poluprovodničke industrije su razvijale i davale na uvid javnosti projekciju svog daljeg razvojnog puta i skup direktiva, koje su ostalim industrijskim učesnicima pomagale u tehnološkom praćenju Murovog zakona. Dokument koji je sadržao ove direktive poznat je pod nazivom „Međunarodna tehnološka mapa puta za poluprovodnike“, što je kao koncept dobilo naziv „Još više Mura,“ budući da je Murov zakon od desetogodišnje prognoze postao imperativ industrije poluprovodnika. Drugim rečima, poluprovodnička industrija je pratila zakon, koji je sama sebi nametnula.

Iz generacije u generaciju mikroprocesori su imali sve više tranzistora i ostalih pratećih komponenata, koji su zbog činjenice, da su čipovi ostajali približno istih dimenzija, postajali sve manji. Zahvaljujući tome bilo je moguće postići još jedan važan efekat: povećanje radne učestanosti procesora. U početku je to bilo vrlo ohrabrujuće, jer je po ceni jednog, bilo moguće postići dva cilja, čime je poznata marketinška krilatica „2 u 1“ (tj. dva proizvoda u jednom) bila realizovana u pravom smislu te reči. Proizvođači su počeli da veruju da se svakim smanjenjem dimenzija tranzistora „dobre stvari dešavaju po automatizmu“. Osim što je učestanost rasla, smanjivala se i potrošnja procesora po operaciji, što je bila dodatna dobit minijaturizacije.

Međutim, negde na početku novog milenijuma, kada su se dimenzije naprava smanjile na oko 90 nm, nastali su prvi problemi koji su bili vezani za „gužvu” nastalu usled velikog broja tranzistora na malom prostoru čipa. Komutacija tranzistora na sve višim učestanostima, uz otežanu i slabiju kontrolu protoka struje pri isključenju, na sve manjem prostoru, dovela je do pregrevanja čipova. Pojedini inženjeri su upozoravali na problem, ali je reakcija izostala jer je moto proizvođača bio i ostao: performanse po svaku cenu!

Pregrevanje je postalo fundamentalan problem mikroprocesora, jer je odvođenje toplote sa čipova problem koji se teško rešava. Osim toga, postalo je jasno da niko ne želi da kupi uređaj, kao što je npr. mobilni telefon, koji može da ga opeče. Zato su proizvođači pribegli jedinom rešenju koje su imali u tom trenutku, a to je da limitiraju učestanost takta mikroprocesora, čime je limitirano i prekomerno generisanje toplote. Od 2004. godine učestanost procesora nije značajno menjana.

Da bi broj tranzistora na čipu i dalje sledio Murov zakon uz prateće ograničenje učestanosti takta, bilo je potrebno redizajnirati procesore i umesto jednog procesora, koristiti više njih, npr. 2, 4 ili više, tačnije preći na arhitekturu sa većim brojem „jezgara”, što je alternativni naziv za procesore. Na primer, danas se u desktop računarima i pametnim telefonima, tzv. smartfonima, obično koristi 4 do 8 procesora. U principu, distribucija poslova među procesorima, koji rade na nižim učestanostima, trebalo bi da dovede do potpune zamene jednog procesora, koji radi na onoliko puta višoj učestanosti, koliki je broj procesora. U praksi to znači da je problem koji obrađuje jedan procesor, potrebno paralelizovati i dodeliti svakom od procesora koji ga zamenjuju, što je za mnoge algoritme ili vrlo teško, ili čak nemoguće realizovati. U tom smislu povećanje broja procesora koji rade na nižoj učestanosti ne mora obavezno da znači da će biti moguće postići kompenzaciju ili prevazilaženje performansi procesora koji radi na visokoj učestanosti, naprotiv. Uprkos tome, kada se limitiranje radne učestanosti i povećanje broja procesora kombinuje sa kreativnim i pažljivim dizajnom, koji sprečava različite štetne efekte, kao što su npr. elektronska curenja, moguće je pridržavati se Murovog zakona uz povećanje performansi računara.

Međutim, limitacija performansi koja nastaje kao rezultat multiprocesorske arhitekture sa nižom učestanošću rada, nije negativno uticala na razvoj i ekspanziju mobilnog Interneta. Korisnici su u početku koristili desktop računare za pristup Internetu, da bi vremenom prešli na multifunkcionalne mobilne uređaje. Pristup bilo kojoj informaciji putem Interneta zahteva nekoliko desetina milisekundi zbog konačne brzine transmisije signala, tako da je mikroprocesor koji radi na nekoliko GHz više nego dovoljan da omogućiti uspešan komunikacioni saobraćaj. Devedesetih godina prošlog veka pojavili su

se mobilni telefoni koji su koristili učestanosti od 800 do 900 MHz u skladu sa specifikacijama globalnog sistema za mobilne komunikacije (GSM). Ove učestanosti su evolvirale sa upotrebom 4G i LTE tehnologije na opseg 2.5 – 2.7 GHz, što je i dalje u okvirima kapaciteta poluprovodničkih integrisanih kola. Mobilni telefoni tipično troše ispod 5 W snage, što je snaga koja se uklapa u termalne limite integrisanih kola. Murov zakon nije zaobišao ni aplikacione procesore pametnih mobilnih telefona, pa je tako npr. u A5 telefonima broj tranzistora u procesoru jedna milijarda, u A6 dve milijarde, dok je u slučaju A6X u pitanju tri milijarde. Za A9 seriju se očekuje broj od 2.7 do 4.9 milijardi tranzistora u zavisnosti od primene. Mnogo važnija za mobilne telefone je sposobnost da obezbede baterijsko napajanje u dužem vremenskom periodu u toku koga postoji interakcija sa okruženjem i korisnicima. Čipovi tipičnih smart telefona šalju i primaju signale govornih poziva, Wi-Fi signale, blutut signal i signal globalnog pozicionog sistema – GPSa, dok istovremeno moraju da registruju dodir, rastojanje, ubrzanje, magnetsko polje, pa čak i otiske prstiju. Pored toga, uređaj mora da poseduje namensko kolo za menadžment napajanja koje bi sprečavalo da sve ove funkcije potroše bateriju.

Permanentna potreba za informacijama dovela je do pojave i formiranja gigantskih klastera servera i memorijskih banaka pod nazivom dejta-centri (Gugl, Fejsbuk, Amazon i sl.). U ovom okruženju performanse su od ključnog značaja, zbog čega se u njihovoj realizaciji primenjuju moćni i vrhunski mikroprocesori koji prate Murov zakon. Upravo zbog termalne disipacije ovih procesora neophodna je primena složenih rashladnih sistema kojima se ublažavaju i kontrolišu efekti pregrevanja procesora. Snaga koja se troši u ovim centrima rapidno eskalira ka stotinama MW. Komunikacija u okviru dejta-centra ostvaruje se optičkim vlaknima zbog malih gubitaka pri prenosu signala. Sa druge strane i ovaj vid komunikacije zahteva primenu integrisanih kola u cilju eliminacije grešaka u prenosu, što se postiže korišćenjem specijalizovanih integrisanih kola za obradu signala. Pored dejta-centara, koje pojedine velike kompanije razvijaju za svoje potrebe, male firme ili pojedinci za skladištenje i obradu podataka često primenjuju klauz sisteme, kod kojih se informacije putem Interneta skladište na farmama servera, najčešće lociranim kod internet provajdera. To suštinski znači da se zahvaljujući Internetu, procesori premeštaju od korisnika ka provajderima. Primena mikroprocesora je od izuzetne važnosti za realizaciju super-kompjuteru, koji se dominantno koriste u naučno-istraživačke i vojne svrhe. Na sajtu „top500,“ moguće je naći listu super-kompjuteru rangiranu po njihovim performansama. U ovom trenutku najbolji svetski super-kompjuter je Sanvej TajhuLajt, razvijen u Kini, koji sadrži nešto više od 10.5 miliona mikroprocesora koji rade na učestanosti od 1.45 GHz, i čija se performansa kreće oko 93 PFlop/s, dok potrošnja iznosi oko 15 MW.