

ROK ŽITKO

**KVANTNE IN
RAČUNALNIŠKE
TEHNOLOGIJE**

DMFA – ZALOŽNIŠTVO

LJUBLJANA 2017

CIP – Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

530.145(075.8)

ŽITKO, Rok, 1978–

Kvantne in računalniške tehnologije / Rok Žitko. – Ljubljana: DMFA –
založništvo, 2017. – (Zbirka izbranih poglavij iz fizike, ISSN 1408-0451; 51)

ISBN 978-961-212-278-2

288461312

Predgovor

Namen učbenika je dodiplomskim študentom naravoslovnih in tehničnih ved z osnovnim znanjem matematike in fizike predstaviti osnove kvantne mehanike in fizike trdnih snovi, ter tako omogočiti razumevanje delovanja in izdelave sodobnih in prihajajočih računalniških in komunikacijskih naprav, senzorjev in bodočih kvantnih tehnologij. Nivo obravnave osnovnih pojavov in zakonitosti je dokaj podroben, vendar brez strogih dokazov in dolgih izpeljav. Kljub potrebi po vpeljavi številnih novih matematičnih pojmov, predvsem pri obravnavi kvantne teorije, je poudarek na fizikalnih pojavih in njihovi interpretaciji, manj pa na matematičnem formalizmu. Pomembni pojmi so zapisani v *nagnjeni pisavi*, ko se pojavijo prvič.

Kazalo

1	Nihanje in valovanje	11
1.1	Sistem, stanje, enačbe gibanja	11
1.2	Nihanje	12
1.3	Kristalni oscilatorji	14
1.4	Linearnost	14
1.5	Eulerjeva enačba in polarni zapis	16
1.6	O merjenju in merilnikih	17
1.7	Sklopljeni nihali in problem lastnih vrednosti	18
1.8	Valovanje	19
1.9	Valovna funkcija	20
1.10	Izpeljava valovne enačbe	21
1.11	Ravni val	23
1.12	Struna	24
1.13	Načelo superpozicije	26
1.14	Interferenca	26
1.15	Youngov poskus	28
1.16	Utripanje in valovni paket	29
2	Snov in sevanje	31
2.1	Zgodovinski pregled do začetka 20. stoletja	31
2.2	Začetek moderne fizike	33
2.3	Kvantna polja	34
2.4	Dualnost delec-valovanje	35
2.5	Standardni model in osnovni delci	36
2.6	Fermioni	37
2.7	Bozoni	38
2.8	Temna snov in temna energija	38
2.9	Ohranitev naboja in umeritvene simetrije	38
2.10	Svetloba	39
2.11	Toplotno sevanje	40
2.12	Foton	42
2.13	Fotoefekt	43
2.14	Sevalni tlak	44

2.15	Comptonovo sipanje	44
3	Kvantna mehanika	47
3.1	Vektorski prostor	47
3.2	Skalarni produkt	48
3.3	Bra-ket (Diracov) zapis	50
3.4	Hilbertov prostor	50
3.5	Dvonivojski sistem	50
3.6	Spin	51
3.7	Sternov in Gerlachov eksperiment	52
3.8	Verjetnostna interpretacija	53
3.9	Meritve v klasični in v kvantni mehaniki	54
3.10	Opazljivke in operatorji	55
3.11	Hermitska konjugacija	56
3.12	Operatorji za spin	57
3.13	Lastna stanja, lastne vrednosti	57
3.14	Bornovo pravilo	58
3.15	Faze verjetnostnih amplitud	60
3.16	Kubit	61
3.17	Kolaps valovne funkcije	62
3.18	Preizkuševalec bomb	63
3.19	Izrek o prepovedi kloniranja	64
3.20	Schrödingerjeva enačba in stacionarna stanja	64
3.21	Dinamika dvonivojskega sistema	65
4	Kvantno računanje in komuniciranje	69
4.1	Klasični računalniki	69
4.2	Kvantni računalniki	69
4.3	Sestavljeni sistemi in tenzorski produkt	70
4.4	Sistem več kubitov	72
4.5	Meritve v večkubitnih sistemih	73
4.6	Bellova stanja in kvantna prepletenost	74
4.7	Unitarnost in časovni potek	75
4.8	Kvantna vezja	76
4.9	Enokubitna kvantna vrata	77
4.10	Večkubitna kvantna vrata	78
4.11	Holevov izrek	80
4.12	Supergosto kodiranje	81
4.13	Kvantna teleportacija	82
4.14	Kvantni paralelizem	83
4.15	Shorov algoritem	84
4.16	Groverjev algoritem	84

5	Kvantni delci	85
5.1	De Brogliejeva zveza	85
5.2	Valovna funkcija	87
5.3	Schrödingerjeva enačba za valovno funkcijo	87
5.4	Operatorji za valovne funkcije	88
5.5	Prosti delec in ravni val	89
5.6	Operator gibalne količine in tok delcev	90
5.7	Delec v potencialu	91
5.8	Vezana stanja	92
5.9	Potencialne jame	92
5.9.1	Neskončno globoka kvadratna potencialna jama	93
5.9.2	Končno globoka kvadratna potencialna jama	95
5.9.3	Parabolična potencialna jama (kvantno harmonično nihalo)	97
5.10	Gibanje elektronov skozi prepreke	98
5.10.1	Potencialni skok	98
5.10.2	Potencialna plast	101
5.10.3	Tunelski pojav	103
6	Kvantna nedoločенost	105
6.1	Merske napake	105
6.2	Interferenca in uklon	106
6.3	Verjetnostna gostota	107
6.4	Heisenbergova neenačba	109
6.5	Nedoločенost za vezana stanja	110
6.6	Združljivost in komplementarnost	111
6.7	Kvantna radirka	112
6.8	Bellova neenačba in njena kršitev v kvantni mehaniki	113
7	Kvantni računalniki	117
7.1	Dekoherenca	117
7.2	Kvantno odpravljanje napak	119
7.3	Ioni v elektromagnetni pasti	120
7.4	Magnetna resonanca	123
7.5	SQUID	124
7.5.1	Superprevodnost	124
7.5.2	Josephsonov pojav	125
7.5.3	SQUID in kubit na osnovi fluksa	126
7.6	Kvantne pike	127
7.7	Drugi predlogi	127
8	Elektronska mikroskopija	129
8.1	Vrstični elektronski mikroskop (SEM)	129
8.2	Transmisijski elektronski mikroskop (TEM)	131
8.3	Vrstični tunelski mikroskop (STM)	131

9	Elektroni v snovi	133
9.1	Bohrov model atoma	133
9.2	Atomske orbitale	135
9.3	Periodni sistem	137
9.4	Kemijske vezi	139
9.4.1	Ionska vez	139
9.4.2	Kovalentna vez	140
9.5	Kristali	142
9.6	Računska kemija	143
9.7	Določanje kristalne strukture	144
9.8	Struktura elektronskih pasov	145
10	Kovine	147
10.1	Model prostih elektronov	147
10.2	Gostota stanj	149
10.3	Fermi-Diracova porazdelitev	149
10.4	Gibanje elektrona v zunanem polju	150
10.5	Transportni pojavi, susceptibilnost	151
10.6	Ohmov zakon	152
10.7	Difuzijsko prevajanje	153
10.8	Kvantno koherentno prevajanje	155
11	Polprevodniki in izolatorji	157
11.1	Intrinzični polprevodniki, vrzeli	158
11.2	Temperaturna odvisnost gostote nosilcev naboja	159
11.3	Giblјivost in prevodnost	160
11.4	Dopirani polprevodniki	161
11.4.1	Polprevodnik n	161
11.4.2	Polprevodnik p	162
11.5	Magnetni polprevodniki	163
11.6	Izolatorji	163
11.7	Topološki izolatorji	165
12	Polprevodniške naprave	167
12.1	Hallova sonda	167
12.2	Fotoprevodnik	168
12.3	Dioda	169
12.4	Fotodioda	172
12.5	Svetleča dioda	173
12.6	Tranzistor na učinek polja	174
12.7	Tehnologija CMOS	175
12.8	Laser	176
12.8.1	Stimulirano sevanje	176
12.8.2	Polprevodniški laser	178
12.8.3	Koherenca	179

13 Heterostruktore	181
13.1 Izdelava heterostruktur	181
13.2 Heterospoj p-n	183
13.3 Nizkodimenzionalne strukture	184
13.3.1 Dvodimenzionalni sistemi	184
13.3.2 Enodimenzionalni sistemi	185
13.4 Kvantna jama	186
13.5 Kvantna žica	186
13.6 Kvantna pika	187
13.7 Kvantni Hallov pojav	187
13.8 Laserji iz heterostruktur	188
14 Nanotehnologija	191
14.1 Prevodnost nanoskopskih naprav	191
14.2 Kvantni točkovni stik	193
14.3 Enoelektronski tranzistor	194
14.4 Sklopljene kvantne pike	196
14.5 Grafen	197
14.6 Ogljikove nanocevke	198
14.7 Molekularna elektronika	199
15 Magnetizem	201
15.1 Magnetno polje	201
15.2 Feromagnetizem	202
15.3 Feromagnetni materiali	204
15.4 Magnetna anizotropija	204
15.5 Spintronika	205
15.6 Magnetoupornost	206
15.7 Spinski ventil	207
15.8 Spinski tranzistor	207
16 Hranjenje podatkov	209
16.1 Magnetni pomnilniki: trdi diski in magnetni trakovi	209
16.1.1 Superparamagnetna meja	209
16.1.2 Magnetne plošče	210
16.1.3 Bralno pisalna glava	211
16.1.4 Trajnost zapisa na magnetnih nosilcih	212
16.2 Polprevodniški trajni pomnilniki	212
16.3 Optični pomnilniki	214
16.4 Spintronski pomnilniki: MRAM	215
16.5 Prihajajoče tehnologije	216

