Зоран М. Марковић
Биљана М. Тодоровић Марковић

НАНОСТРУКТУРНЕ СОЛАРНЕ ЋЕЛИЈЕ

Рецензенти
Др Дејан Раковић
Др Мирослав Драмићанин
Др Зоран Николић

Издаје и штампа
АКАДЕМСКА МИСАО
Београд

Тираж 300 примерака

ISBN 978-86-7466-464-3

Садржај

САДРЖАЈ II
ПРЕДГОВОР VII
1. ИСТОРИЈА И БУДУЋНОСТ СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ 1
1.1. Флексибилне соларне ћелије 1
1.2. Зашто улазимо у соларно доба 4
1.3. Апсорпција соларне светлости и ефикасна трансформација енергије 7
1.4. Три таласа иновација 10
1.5. Соларни дизајн 12
1.6. Нова предузећа за производњу соларних ћелија 15
2. ФОТОНАПОНСКИ ГЕНЕРАТОР 21
2.1. Принцип рада соларне ћелије 21
2.3. Границе ефикасности фотонапонске конверзије 31
2.4. Вишеслојне ћелије 33
2.5. Апликације соларних ћелија 35
3. НЕОРГАНСКИ ТАНКИ СЛОЈЕВИ 41
3.1. Танкослојне соларне ћелије: технологија за будућност 41
3.2. Танкослојни аморфни силицијум 44
3.3. BIGS танки слојеви на металним фолијама 46
3.4. Кадмијум-телурид танки слојеви 50
3.5. Бакар-индијум-диселенид танки слојеви 53
4.1. Органске соларне ћелије 57
4.2. Соларне ћелије са бројним запреминским хетероспојевима 60
4.3. Оптимизација органских соларних ћелија 61
4.4. Штампане пластичне соларне ћелије 64
4.5. Комерцијалне пластичне соларне ћелије 68
5. ОРГАНСКО-НЕОРГАНСКИ ТАНКИ СЛОЈЕВИ 72
5.1. Ћелије са органским бојама 72
5.2. Принцип рада соларних ћелија побуђених органским фотосензитером 75
5.3. Будући развој SĆOF 82
5.4. Архитектонско интегрисање SĆOF 85
6. НОВЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ 90
6.1. Соларни парадокс 90

6.4. Наноантене 97
6.5. Соларне ћелије на бази колоидних квантних тачака 101

7. ХЕЛИОНОМИЈА 111

7.1. Како нафта утиче на промену климе 111
7.2. Соларна енергија и капитална тржишта 114
7.3. Нулта емисија 116
7.4. Тржиште соларне енергије 118
7.5. Трендови фотонапонских технологија 123

8. УГЉЕНИЧНИ НАНОМАТЕРИЈАЛИ ЗА СОЛАРНЕ ЋЕЛИЈЕ-ФУЛЕРЕНИ 126

Синтеза фулерена 126
Структура молекула C_{60} 128
8.2. Структура фулерена 130
8.3. Фулерени у гасном стању 133
8.4. Фулерени у чврстом стању 135
Структурне особине 135
8.5. Електричне особине 137
8.6. Фулеренске соларне ћелије 139
Напредак у дизајну, синтези и контроли особина материјала 144
Материјали са малим енергетским процепом 144

9. УГЉЕНИЧНЕ НАНОЦЕВИ 149

9.1. Структура једнослојних угљеничних наноцеви 150
9.2. Синтеза једнослојних угљеничних наноцеви 151
Електро-лучно пражњење 152
Ласерска аблација 153
Хемијска депозиција из парне фазе 153
Разлагање угљен-моноксида под високим притиском 154
9.3. Дефекти у структури наноцеви 155
9.4. Особине угљеничних наноцеви 156
Електричне особине угљеничних наноцеви 156
Механичке особине 160
Топлотне особине 161
9.5. Растворљивост и функционализација угљеничних наноцеви ... 161
Нековалентна функционализација угљеничних наноцеви 163
Ковалентна функционализација угљеничних наноцеви 167
9.6. Органске пластичне ћелије на бази угљеничних наноцеви 168

10. ГРАФЕН 175

10.1. Електрично допирање графена 175
10.2. Хемијско допирање графена 176
10.5. Припрема танких слојева графена из колоида 180
10.6. Прозрачност и слојна проводност графенских танких слојева 181
10.7. Графен у органским соларним ћелијама 182
Графен као адитив 183
Графен као електрода 183
Графен као посебан слој за органске фотонапонских ћелије 184
Шоткијев фотонапонски спој п- допирани графен- п- допирани силицијум 184

Д1. ОСНОВЕ КВАНТНЕ МЕХАНИКЕ И СТАТИСТИЧКЕ ФИЗИКЕ ... 187

Д1.1. Дуалност талас-честица 187
Д1.2. Шредингерова једначина 187
Д1.3. Релације неодређености 189
Пролаз наночестице кроз потенцијалну баријеру: тунелски ефекат 192
Атом сличан водонику 198
Д1.6. Симетрија, дегенерација и уклањање дегенерације 201
Д1.7.Опис стања макроскопског система 202
Статистички опис система 204
Недегенерисани и дегенерисани системи 204
Класична и квантна статистика 205
Д1.8. Функција расподеле за недегенирасане и дегенерисане гасове 206
Уклањање дегенерације 207
Д1.9. Правила статистичког усредњавања 209

Д2. ОСНОВИ ЗОНСКЕ ТЕОРИЈЕ ПОЛУПРОВОДНИКА 212

Д2.1. Зонска природа енергетског спектра кристала 212
Колективизација електрона у кристалу 212
Формирање енергетских зона 214
Дисперзионе криве 215
Д2.2. Ефективна маса електрона 217
Д2.3. Попуњавање зона електронима 219
Подела тела на метале, диелектрике и полупроводнике 219
Д2.4. Сопствени полупроводници 221
Концепт шупљине 221
Д2.5. Примесни нивои у полупроводницима 223

Д3. СТАТИСТИКА ЕЛЕКТРОНА У ЧВРСТИМ ТЕЛИМА 228

Д3.1. Функција густине стања у енергетским зонама 228
Д3.2. Статистика електрона у металима 229
Д3.3. Недегенерисани полупроводници 232
Д3.4. Положај Фермијевог нивоа и концентрација наелектрисања у сопственим и допираним полупроводницима 235

Нискотемпературска област ... 236
Област средњих температура ... 238
Високотемпературска област (област сопствене проводности) ... 238
Допирани полупроводници акцепторског типа ... *239*
Јако допирани полупроводници ... *239*
Д3.5. Главни и споредни носиоци наелектрисања ... 241
Закон одржања масе ... *241*
Д3.6. Неравнотежни носиоци ... 241
Квази Фермијеви нивои ... *242*
Д3.7. Рекомбинација носилаца ... 243
Међузонска рекомбинација ... *244*
Рекомбинација преко примесних нивоа ... *246*

Д4. ТЕРМАЛНЕ ОСОБИНЕ ПОЛУПРОВОДНИКА ... 249

Д4.1. Концепт кристалне моде вибрације ... 249
Д4.2. Спектар вибрација кристала ... 252
Д4.3. Концепт фонона ... 254
Д4.4. Топлотни капацитет чврстог тела ... 255
Д4.5. Термална проводност чврстих тела ... 257
Провођење топлоте преко решетке кристала ... *257*
Провођење топлоте електронима ... *259*

Д5. ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВОДНОСТ ЧВРСТИХ ТЕЛА ... 262

Д5.1. Природа провођења електрицитета кроз чврста тела ... 262
Дрифт електрона ... *262*
Електрична проводност ... *265*
Д5.2. Покретљивост слободних носилаца и њена температурска зависност ... 266
Д5.3. Електрична проводност у металима и легурама ... 268
Д5.4. Сопствена и примесна проводност полупроводника ... 269
Примесна проводност у полупроводницима ... *270*

Д6. КОНТАКТНИ ФЕНОМЕНИ И УРЕЂАЈИ ... 274

Д6.1. Излазни рад ... 274
6.2. Термојонска емисија ... 276
Д6.3. Контактна разлика потенцијала ... 278
Д6.4. Спој електрон-шупљина ... 279
Фузиони метод ... *279*
Метод извлачења ... *280*
Дифузиони метод ... *280*
Техника епитаксијалног раста ... *280*
Метод јонске имплантације ... *281*
Д6.5. Равнотежно стање pn споја ... 281

Инверзна струја ... *288*

Д7. ПОВРШИНСКИ ФЕНОМЕНИ ... 292

Д7.1. Површинска стања ... 292
Брза и спора површинска стања ... *294*
Д7.2. Слој просторног наелектрисања близу површине ... 294
Д7.3.Проводност површине ... 298
Д7.4. Површинска рекомбинација ... 300
Д7.5. Утицај површинске проводности на рад полупроводних уређаја ... 301
Утицај на струју pn споја ... *301*
Површински пробој pn споја ... *303*

Д8. ОПТИЧКЕ И ФОТОЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЈАВЕ У ПОЛУПРОВОДНИЦИМА ... 305

Д8.1. Апсорпција светлости ... 305
Апсорпција у слободним носиоцима ... *308*
Апсорпција на атомима примеса ... *309*
Д8.2. Фотопроводност у полупроводницима ... 309
Д8.3. Фотоелектрични ефекат у pn споју ... 312
Д8.4. Радијативна рекомбинација у полупроводницима, диоде које емитују светлост ... 314

БИОГРАФИЈЕ АУТОРА ... 317

Предговор

Драги читаоци,

Пред вама је књига „Наноструктурне соларне ћелије“ аутора др Зорана М. Марковића и др Биљане М. Тодоровић Марковић. Циљ аутора књиге је био да ширу јавност упозна са проблематиком израде соларних ћелија на бази угљеничних наноматеријала. Сама књига је тематски гледано подељена у три целине:

- Прва целина (првих седам поглавља) је намењена упознавању читалачке публике са модерним несилицијумским технологијама конструкције соларних ћелија, као и економској исплативости израде и коришћења соларних ћелија. Ова поглавља су писана на такав начин да могу да их разумеју и неинжењерски потковани читаоци.
- У другом делу књиге (поглавља 8, 9 и 10) су детаљно приказане особине угљеничних наноматеријала, као и њихова потенцијална примена и исплативост у изради соларних ћелија. Резултати приказани у овом делу књиге су плод дугогодишњих истраживања самих аутора књиге и намењени су студентима докторских студија, постдокторантима који развијају ове материјале, као и стручњацима за пластичне соларне и графенске соларне ћелије.
- У оквиру додатка књиге дате су основе физике полупроводника и представљене су основне особине класичних макроскопских полупроводника као што су силицијум и германијум. Овај део књиге је намењен студентима докторских студија који хоће да се ближе упознају са физиком чврстог стања.

На овом месту желимо да се захвалимо свим сарадницима који су нам помогли током каријере, нашим професорима са факултета, свим добрим људима које смо срели, нашим родитељима и нашем сину.

Мај, 2013.

Др Зоран М. Марковић
Др Биљана М. Тодоровић Марковић