

## **О ОДСТУПАЊИМА БОЈЕ СВЕТЛОСТИ КОД ПОЈЕДИНАЧНИХ LED СИЈАЛИЦА**

### **1. УВОД**

Осим у неким ограниченим применама као што су врло мали извори светлости, а који користе само једну светлећу диоду, велика већина LED – извора користи три и више диода. Због начина производње диода, долази до одступања боје емитоване светлости код појединачних диода у серији. У применама функционалног осветљења ова одступања немају битног значаја, јер је примарни задатак функционалног осветљења виђење објеката. Код примена у декоративном осветљењу, или осветљењу нпр. уметничких слика, као и у применама за екране, униформност боја појединачних диода је битна како се посматрач не би довео у забуну неправилном репродукцијом боја на појединим зонама слике или неправилностима у емисији боја са екрана.

Предмет овог рада су разлози у одступању боја светлости појединачних сијалица у групи сијалица.

Како су светлеће диоде производ полупроводничке технологије, одступања су логичан резултат начина производње, којом се доводи до малих разлика у кристалној структури појединачних полупроводника. На пример, код сложенијих система, као што су процесорски чипови, недоследности у кристалној структури узрок су око 30 % шкарта у њиховој производњи.

### **2. ПОЛУПРОВОДНИЧКИ СИСТЕМИ**

Допирањем  $n + 1$  и  $n - 1$  валентних аденада (вишак, односно мањак електрона) у кристалну решетку основног материјала, постижу се контролисана полупроводничка својства таквих кристалних система. Технике допирања зависе од типа основног материјала и допанда. Допирање се може изводити у растопу, синтеровањем, гасном дифузијом, дифузијом у чврстој фази итд., што зависи од физичких, механичких и хемијских карактеристика изабраних материјала. Аденди (допанди) распоређују се у кристалној решетки основног материјала неорганских полупроводника, или за везивне орбитале, хелатне парове, итд. органских полупроводника.

Допанди у садејству са основним материјалом дефинишу тип светлеће диоде, односно примарну фреквенцију електромагнетног зрачења. Униформност расподеле, тј. концентрације или активности допанда у појединачном полупроводнику утиче на коначну фреквенцију извора светлости. Мале неуниформности расподеле по појединачним  $p - n$  системима утичу на варијације фреквенција појединачних диода, што коначно у садејству са недоследностима у кристалној структури, даје као резултат мале разлике у боји емитоване светлости.

Варијације боје светлости су зависне и од температуре, тако да ако скуп светлећих диода термостатираних на стандардну температуру од 298 K (25 °C) светли равномерно, односно да су разлике у боји на тој температури безначајне, не мора да значи да се разлике у боји емитоване светлости неће појавити нпр, на температури од 323 K (50 °C). Ентропија би могла бити показатељ ових одступања.

### 3. ЕНТРОПИЈА ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ СИСТЕМА

Квантитативни показатељ одступања у боји светлости светлећих диода могла би бити ентропија кристалног стања. Ентропија је између осталог степен неуређености система; иако се неуређеност сматра субјективном категоријом, а не објективном физичком, ентропијом се може одредити искористивост система.

Из Ајнштајновог (Einstein) статистичког модела кристала израз за ентропију једног мола супстанције је следећи:

$$S = 3Nk \left[ \frac{hv/kT}{e^{hv/kT} - 1} - \ln(1 - e^{-hv/kT}) \right]$$

где су:

- S** – ентропија система
- N** – Авогадров број,  $6.02 \cdot 10^{23}$  1/mol
- v** – фреквенција, 1/s – карактеристика кристалног система
- k** – Болцманова (Boltzmann) константа,  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K
- h** – Планкова (Planck) константа,  $6.26 \cdot 10^{-34}$  J·s
- T** – Температура, K, Келвин (Kelvin)

Горња једначина међутим, релевантна је само за равнотежно стање система, без протока наелектрисања (струје) и без дефеката у кристалној решетци. Када би кристал био идеалан и када не би било транспорта електрицитета, светлећа диода не би ни могла да ради. Постојање полупроводника, па самим тим и светлећих диода, последица су малих несавршености у кристалној решетци. Зато, горњу једначину треба схватити само као путоказ, а не као квантитативно решење за варијације фреквенција – боја. То је можда и срећна околност, јер решавање једначине по фреквенцији био би заматан посао. Додатна отежавајућа околност је да ентропија као величина стања није доступна мерењу, него се иста одређује заобилазним методама, најчешће преко топлотних капацитета.

Споља наметнута ентропија у виду неправилности у кристалној решетци и доведеној енергији доводи до промене фреквенције осциловања у кристалној решетци, а тиме и до промене боје. Треба напоменути да су све те промене мале, тако да се боја не мења драстично, него углавном у нијансама, што ипак може довести у забуну посматрача у применама где је виђење боја од првенственог значаја.

## 4. НЕПРАВИЛНОСТИ – ГРЕШКЕ У КРИСТАЛИМА

Неправилности у кристалној решетки могу бити тачкасте, линијске и просторне. Кад су у питању линијске и просторне грешке, говори се о линијским, степенастим и спиралним дислокацијама. Дислокације су углавном узроковане дејством спољних, механичких сила и нису од значаја за полупроводнике.

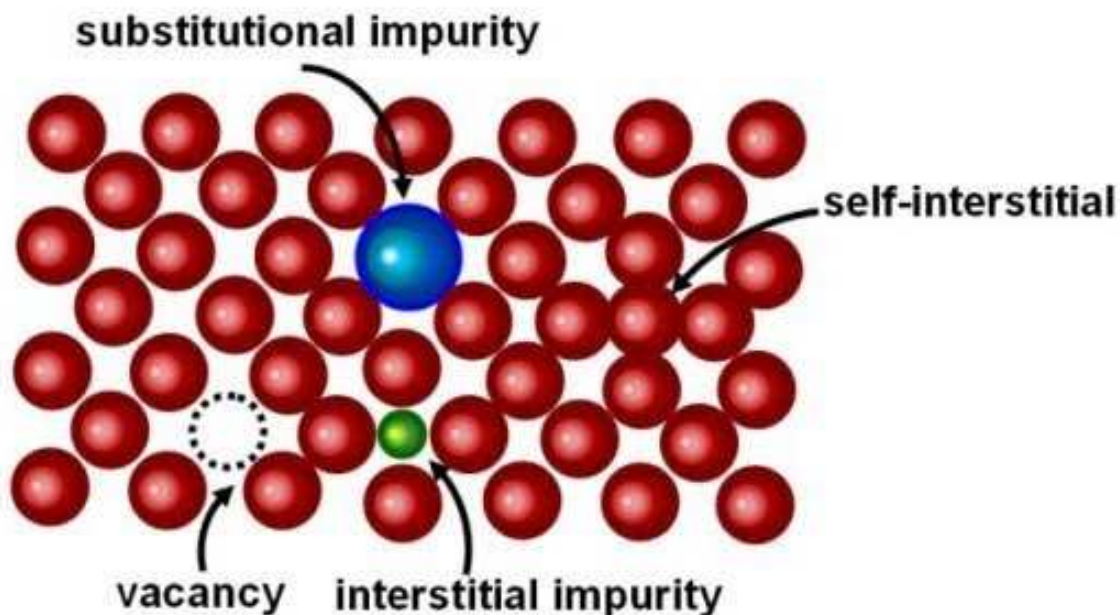
Тачкасте неправилности (Слика 1) су:

Вакансије – недостатак атома или молекула у кристалној решетки. Карактеристичне су за кристале елемената и кристале нејонских једињења, неорганских и органских.

Интерстицијске нечистоће (укључци) – страни атом или молекул укључен у међупростор у кристалу. Интерстицијска нечистоћа може бити сам атом који гради кристалну решетку (аутоинтерстиција), али померен из свог положаја, тада се обично налази у пару са вакансијом, аутоинтерстиција и вакансија могу бити на релативно великом растојању у кристалу.

Супституцијске нечистоће – када страни атом заузме место атома који гради кристалну решетку.

Све горе наведене неправилности односе се на нејонске кристале, као на пример силицијум.



Слика 1. Тачкасти дефекти у кристалној решетки, лоптице су атоми или молекули

Како и јонски кристали као нпр. галијум арсенид, или органски кристали који садрже позитивне карбонијум јоне или негативне карбанјоне, налазе примене у полупроводничким технологијама, приказани су и дефекти у таквим кристалима (Слика 2.).

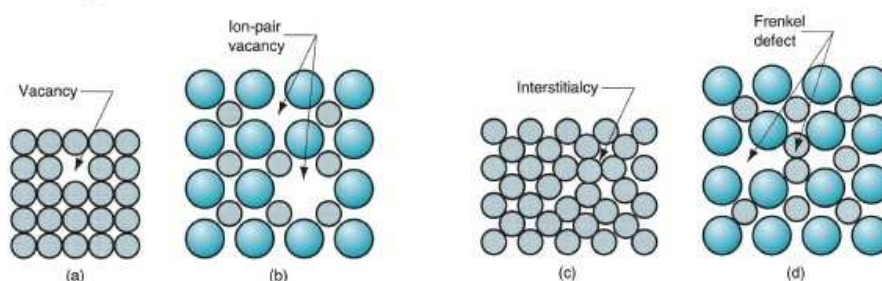
Шоткијев (Schottky) дефект – недостатак јонског пара у кристалној решетки, вакансија јонског пара.

Френкелов дефект – интерстицијски померен јон у кристалној решетки.



## Point Defects

Imperfections in crystal structure involving either a single atom or a small number of atoms



Point defects: (a) vacancy, (b) ion-pair vacancy, (c) interstitialcy, (d) displaced ion (Frenkel Defect).

©2010 John Wiley & Sons, Inc. M P Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing 4/e*

Слика 2. Неправилности у нејонским и јонским кристалима: а) вакансија, б) вакансија јонског пара (Шоткијев дефект), ц) интерстиција, д) измештен јон (Френкелов дефект)

Карактеристично за Шоткијеве и Френкелове дефекте је да јонски кристали задржавају електронеутралност и стехиометрију.

Кристали са дефектима типа вакансија, или аутоинтерстиције са одговарајућом вакансијом (измештен атом или јон), такође задржавају стехиометрију.

Кристали са интерстицијском нечистоћом задржавају електронеутралност ако нечистоће нису јони, али им се стехиометрија мења.

Кристали са супституцијском нечистоћом мењају стехиометрију. Нејонски кристал задржава електронеутралност ако супституент није јон. Јонски кристал задржава електронеутралност само ако је супституент јон једнаког наелектрисања.

Сви дефекти у кристалној структури повећавају ентропију кристала у односу на равнотежну ентропију савршеног кристала и самим тим мењају и фреквенције – боје.

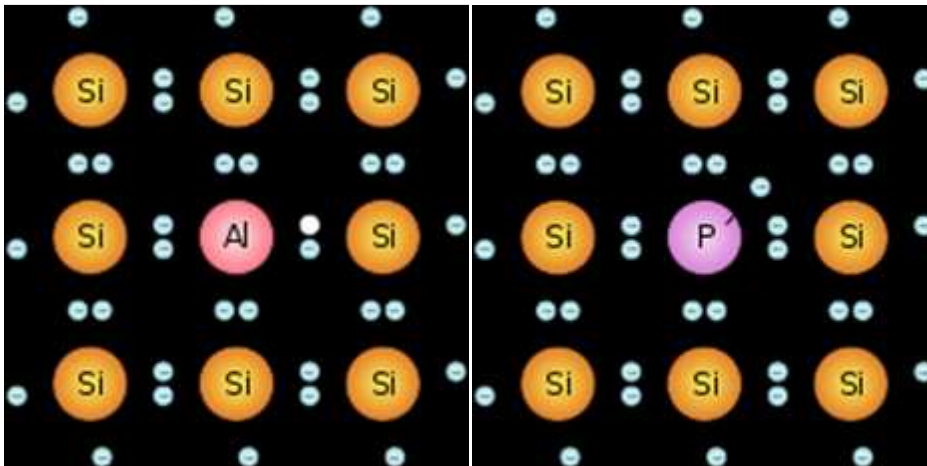
## 5. ДОПИРАЊЕ ПОЛУПРОВОДНИКА

Контролисано увођење жељених примеса у кристалну решетку, најчешће у виду супституената, назива се допирање. Допирајући агенс се не сматра нечистоћом иако је страном телом у кристалу. Допирање, како је већ наведено у тачки 2., може се изводити у растопу, синтеровањем, гасном дифузијом, дифузијом у чврстој фази итд., што зависи од физичких, механичких и хемијских карактеристика изабраних материјала. Допира се обично метал или металоид прелазним металом, али и све чешће репрезентативним металом или неметалом.

Допанд и основни материјал најчешће треба да задовоље Хјум-Ротаријева (Hume-Rothery) правила:

- 1) Пречници атома допанда и основног материјала не треба да се разликују више од 10%.
- 2) Валентце основног материјала и допанда не треба да се разликују за више од 1.
- 3) Обе супстанције треба да граде исту кристалну решетку.

Одступања од ових правила су могућа, јер не ради се о легирању или синтези једињења, него уградњи на појединим местима кристалне решетке. Разлика у валентности основног материјала и допанда је неопходна, иначе се полупроводничке карактеристике не би ни оствариле.



Слика 3. Допирани атоми алуминијума и фосфора у решетки силицијума

Треба напоменути да су допирани кристали електронеутрални. Јасно је да се стехиометрије алуминијумом допираног силицијума и фосфором допираног силицијума разликују међусобно и у односу на чист силицијум (Слика 3.).

Карактеристике полупроводника зависе од концентрације и места допанда у кристалној решетки. Место атома допанда у кристалној решетки може бити на рогуљу, страни или у средишту, тако да се могу добити различите структуре са једнаким концентрацијама допанда. Ниједан поступак допирања не гарантује униформност серије свих добијених полупроводника по саставу и структури. Можда би се методама тунелске микроскопије могла обезбедити униформност састава и структуре полупроводника, али поступак би трајао неколико милијарди

година по молу супстанције. Из тих разлога су и примене фулерена у полупроводничкој технологији тренутно у застоју.

Иначе, осим што састав и структура полупроводника по допандима нису униформни, сигурно већина полупроводника у произведеној серији није без бар неке од мана наведених у тачки 4.

## 6. УТИЦАЈ НА СВЕТЛЕЋЕ ДИОДЕ

Све наведено у тачкама 4. и 5. утиче на карактеристике коначног производа – светлеће диоде, колоквијално LED-а. Разлике између појединачних диода у произведеној серији огледају се како у луменима или канделама емитоване светлости поједине диоде, тако и у фреквенцији односно боји емитоване светлости.

Технологије израде полупроводника се вероватно унапређују, али нагласак је на смањењу технолошког (неизбежног) шкарта.

Ради униформности боје једног сложеног полупроводничког извора светлости и даље ће у производњи бити неопходна контролна мерења и сепарација извора по групама боја, у којима ће се обезбедити захтевана униформност. То данас и није неки проблем, јер у процесу примарне производње светлећих диода израда, контрола и сепарација су аутоматизоване. Сијалице које не задовоље захтеве униформности боје наћи ће место у по униформности боја мање захтевним применама општег осветљења.

Остаје проблем заменских извора, када једном ипак примењеним сијалицама истекне рок трајања или се оштете из разних разлога. Надајмо се да су произвођачи обезбедили потребну следљивост.



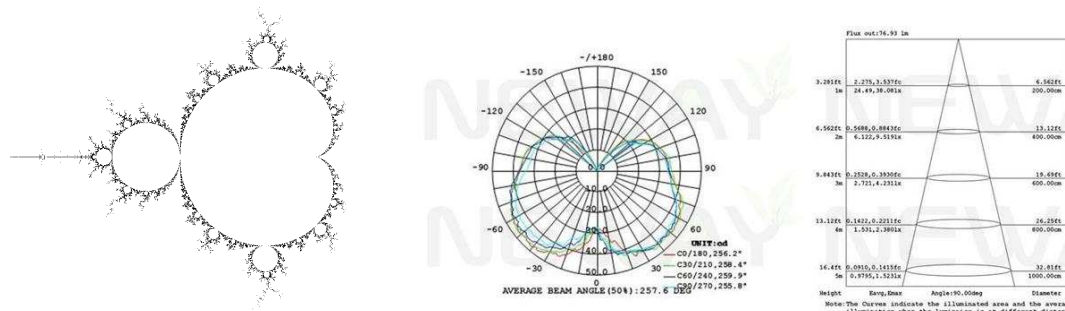
Слика 4. Израда и контрола светлећих диода

## 7. ШТА ДАЉЕ?

Развој теорије која претходи новим пробојима у технологији LED-а, по свему судећи, неће бити могућ без примене математике (теорије) хаоса, која се бави дисконтинуитетима у привидно континуалним процесима. Можда ће теорија хаоса дати неке нове смернице за управљање технолошким процесима који би водили већој униформности боје светлећих диода.

Главно ограничење примене фулерена у осветљењу је спорост процеса њихове модификације у ефикасни светлећи полупроводник. Чека се неки нови продор у технологији.

Узгред, део математике хаоса су операције са фракталима. За оне који су упућени у математику фрактала можда би био занимљив Манделбровов (Mandelbrot) чији график подсећа на криву расподеле светлости тачкастих извора. Расподела светлости сложене LED светиљке би се могла одредити реверсним рачуном (од ситнијег ка крупнијем), а такође би се могла наћи примена Манделбрововог фрактала у дизајнирању и оптимизацији сложених LED светиљки, Слика 5.



Слика 5. Манделбровов фрактал (лево) и крива расподеле LED светиљке

## РЕЗИМЕ

Осим у неким ограниченим применама као што су врло мали извори светлости, а који користе само једну светлећу диоду, велика већина LED – извора користи три и више диода. Због начина производње диода, долази до одступања боје емитоване светлости код појединачних диода у серији. У применама функционалног осветљења ова одступања немају битног значаја, јер је примарни задатак функционалног осветљења виђење објеката. Код примена у декоративном осветљењу, или осветљењу нпр. уметничких слика, као и у применама за екране, униформност боја појединачних диода је битна како се посматрач не би довео у забуну неправилном репродукцијом боја на појединим зонама слике или неправилностима у емисији боја са екрана. Предмет овог рада су разлози у одступању боја светлости појединачних сијалица у групи сијалица.

## **ABSTRACTS**

Most LED sources apply three or more LEDs. Very few types of luminaries are equipped with one or two lamps. Due to the production techniques the random deviations in light colour of unique lamps in the series occurs. For functional lighting applications these deviations are not significant, but in applications where the colour rendering is essential, and also in screen applications, the non-uniformity in colour of each single LED can cause to the observer a lot of inconveniency. Subject of this work is to list the reasons for the appearance of the emitted light colour deviations of single lamps in production series.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Уџбеници и монографије из физичке хемије и термодинамике
2. Група аутора, Увод у теорију хаоса, Саобраћајни факултет и Рударски факултет Универзитета у Београду
3. Сlike са Интернета