

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет
імені Олеся Гончара

Л. В. Накашидзе, В. О. Габрінець, Ю. О. Мітіков

ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ДНІПРОПЕТРОВСЬК
АКЦЕНТ ІІІ
2016

УДК 621.311.243(075.8)
ББК 31.63я73
Н21

*Друкується відповідно до рішення Вченої Ради Дніпропетровського
національного університету імені Олеся Гончара
(протокол №6 від 21 квітня 2016 р.)*

Рецензенти: **М. В. Губинський** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової теплотехніки Національної металургійної академії України;
В. Г. Сиченко – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електрозабезпечення Дніпропетровського державного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Накашидзе Л. В., Габрінець В. О., Мітіков Ю. О.

Н21 Застосування фотоелектричних систем для отримання електричної енергії: Навчальний посібник / Л. В. Накашидзе, В. О. Габрінець, Ю. О. Мітіков. – Дніпропетровськ: ДНУ імені Олеся Гончара, ТОВ «Акцент ПП», 2016. – 146 с.

ISBN 978-966-921-078-4

У навчальному посібнику наведено методологічні відомості для лабораторних робіт, які спрямовані на отримання практичних навиків роботи з обладнанням та матеріалами, що використовуються при перетворенні сонячної енергії в електричну. Роботи скомпоновані таким чином, що вони містять теоретичний матеріал, опис методики проведення роботи та контрольні запитання, відповідаючи на які, студенту легше зорієнтуватись при формулюванні висновків. Матеріал супроводжується необхідними теоретичними відомостями, ілюстраціями, ключовими поняттями і категоріями. Даний навчальний посібник має науково-практичне значення й розрахований на студентів, магістрів технічних спеціальностей, пов'язаних з використанням відновлюваних джерел енергії, в тому числі сонячної енергії, співпрацівників та менеджерів, які займаються проектуванням комплексних систем енергозабезпечення, тобто використанням енергозберігаючих технологій на промислових підприємствах та в житлово-комунальному секторі України.

УДК 621.311.243(075.8)
ББК 31.63я73
Н21

ISBN 978-966-921-078-4

© Накашидзе Л. В., Габрінець В. О., Мітіков Ю. О., 2016
© ДНУ імені Олеся Гончара, 2016
© ЛІРА, 2016

ПЕРЕДМОВА

„...можно утверждать с большой уверенностью, что люди овладеют солнечной энергией совершенно иными процессами, по всей вероятности, электрической природы. В этом вопросе все еще должно быть создано, но для его решения мы располагаем несколькими столетиями. Стоящая перед нами высокая цель заслуживает трудов и самоотвержения, так как от ее достижения зависит будущее человечества и ее культуры”
Н.А. Умов

Можна лише дивуватися, як сучасно звучать слова М. А. Умова, написані на початку двадцятого сторіччя. Сформульована ним задача освоєння нових джерел енергії, особливо сонячної, сьогодні стала ще більш актуальною.

Природно, що для виконання таких задач необхідні не лише економічна та науково-технічна бази, а насамперед наявність кваліфікованих фахівців, які мають різнобічні знання в галузі використання енергії альтернативних джерел.

Значну роль у становленні фахівця відіграє засвоєння практичних навичок, необхідних у майбутній діяльності. Важливо, щоб студенти не тільки розширювали свої знання, але й навчалися співставляти нові дані та відомі факти, ознайомлювались з практичним діями та прийомами, які вони зможуть використати в своїй професійній діяльності, при самостійному вирішенні поставлених задач. Розвиткові пізнавальних процесів допомагає роз'яснення значення ініціативного ставлення до своєї фахової діяльності, схвалення оригінальних рішень, прагнення знайти відповіді на питання, що виникли в ході практичної діяльності.

Для успішного засвоєння знань необхідно постійно застосовувати їх на практиці. Однією з форм цього є виконання лабораторних і практичних робіт. Саме в процесі активного практичного використання знання стають більш узагальненими. При цьому необхідно враховувати таку психологічну умову: навчання діяльності, що не приносить задоволення, не викликає активного мислення, уваги, не потребує творчого підходу, ініціативи, слабо впливає на

повноту і глибину засвоєння знань. Тому важливо, щоб процес навчання був цікавим, викликав позитивні емоції, почуття.

Головна задача навчального процесу – надати студентам навички самостійної роботи. Одним із таких шляхів є проведення лабораторних робіт. Усі лабораторні роботи, запропоновані в даному виданні, спрямовані на отримання практичних навичок роботи з обладнанням і матеріалами, що використовуються при перетворенні сонячної енергії в електричну. Роботи скомпоновані таким чином, що вони містять теоретичний матеріал, опис методики проведення роботи та контрольні запитання, відповідаючи на які, студенту легше зорієнтуватись при формулюванні висновків.

Курс лабораторних робіт побудований у порядку, що дозволить студентам поступово (від простого до складного) ознайомитись з особливостями перетворення сонячної енергії в електричну.

Засвоєні студентами практичні та теоретичні навички при виконанні всього курсу лабораторних робіт нададуть їм можливість у подальшому легше орієнтуватись у питаннях впровадження перетворювачів сонячної енергії в електричну, оперативно застосовувати отримані знання при проектуванні інноваційних систем енергозабезпечення.

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Акцептор – дефект решітки, який може при збудженні захоплювати електрон з валентної зони;

Акцепторний домішок – домішок, атоми якого є акцепторами;

Атмосферна маса (оптична маса атмосфери) – висота Сонця над горизонтом, що визначає довжину шляху променів в атмосфері. Одиничний АМ відповідає шлях, який пройшли сонячні промені при вертикальному надходженні до рівня моря. Для плоскопаралельної моделі атмосфери оптична маса на рівні моря практично дорівнює косекансу висоти Сонця. Для реальної атмосфери це співвідношення виконується, починаючи від кута 10^0 . АМ (на рівні моря) 1; 1,5; 2; 3; 5 відповідають такі значення висоти Сонця: 90^0 , $41^049'$, 30^0 , $19^027'$, $11^032'$. Атмосферна, або повітряна, маса залежить також від висоти місцевості над рівнем моря: при збільшенні висоти значення АМ знижується пропорційно тиску повітря. На верхній границі атмосфери маса дорівнює нулю, що позначається як умови АМ 0, у той час як наземним вимірюванням відповідають умови АМ1, АМ1,5 і т.д.

Повітряна маса прирівнюється до одиниці на Землі на рівні моря при ясному безхмарному небі, коли Сонце знаходиться у зеніті та промені його падають перпендикулярно на поверхню елементів, що вимірюються (атмосферний тиск у цьому випадку $p_0=1,013 \times 10^5$ Па).

Повітряна маса у будь-якій точці земної поверхні може бути розрахована за рівнянням:

$$m = p/p_0 \sin \theta = p \operatorname{cosec} \theta / p_0,$$

де p – тиск повітря в даній точці поверхні Землі;

θ – кут, що визначає висоту Сонця над лінією горизонту.

Склад атмосфери істотно впливає на параметри наземного сонячного випромінювання.

У 1986 р. технічний комітет № 82 Міжнародної електротехнічної комісії ООН прийняв рішення при вимірюваннях сонячних елементів та

сонячних батарей наземного використання вибрати у якості стандартного потік повного сонячного випромінювання, що дорівнює 1000 Вт/м^2 зі спектром, характерним для умов АМ 1,5 при альбедо поверхні 0,2.

Валентна зона – верхня з заповнених зон напівпровідника, у якій при абсолютному нулі температури всі енергетичні рівні зайняті електронами;

Випромінювальна рекомбінація – рекомбінація, при якій енергія, що вивільнюється при переході електрона на нижчий енергетичний рівень, випромінюється у вигляді кванта світла (фотона);

Вільна зона напівпровідника – дозволена зона напівпровідника, у якій відсутні електрони провідності при абсолютному нулі температури;

Власна концентрація носіїв заряду – концентрація рівноважних носіїв заряду у власному напівпровіднику;

Власний напівпровідник – напівпровідник, який не має домішок, що впливають на його електропровідність;

Генерація носіїв заряду – утворення вільних електронів та дірок, яке проходить при впливі теплового хаотичного руху атомів кристалічної решітки (теплова генерація), при впливі поглинених напівпровідником квантів світла (світлова генерація) й інших енергетичних факторів. Тому, що напівпровідник завжди знаходиться під дією цих факторів або хоча б одного ($T \neq 0$), генерація носіїв проходить безперервно;

Гетерогенний перехід (гетероперехід) – електричний перехід, утворений внаслідок контакту напівпровідників з різною шириною забороненої зони;

Гомогенний перехід (гомоперехід) – електричний перехід, утворений внаслідок контакту напівпровідника з однаковою шириною забороненої зони;

Дефект решітки домішковий – дефект решітки, створений атомом стороннього елементу;

Дислокація – лінійний структурний дефект, що обмежує зону зміщення або область дефекту упаковки всередині монокристалу;

Дифузійна довжина – відстань, на якій в однорідному напівпровіднику

при одномірній дифузії за відсутності електричного та магнітного полів надлишкова концентрація неосновних носіїв заряду зменшується внаслідок рекомбінації в Е раз. Визначається за формулою $L = D \cdot t$, де D – коефіцієнт дифузії, t – термін життя носіїв заряду;

Дірково-дірковий перехід (p - p^+ -перехід) – електричний перехід між двома ділянками напівпровідника p -типу, що мають різні значення питомої електричної провідності;

Довжина вільного пробігу носіїв заряду – середня відстань між двома послідовними зіткненнями носіїв заряду;

Дозволена зона – енергетична зона або сукупність таких, що перекриваються в результаті розщеплення якогось одного або декількох енергетичних рівнів ізольованих атомів у процесі утворення структури кристалу;

Донор – дефект решітки, який може при збудженні віддавати електрон у зону провідності;

Донорний домішок – домішок, атоми якого є донорами;

Електричний перехід – перехідний шар у напівпровідниковому матеріалі між двома ділянками з різними типами електричної провідності або різними значеннями питомої електропровідності або між напівпровідником і металом;

Електронно-дірковий перехід (p - n -перехід) – електричний перехід між двома ділянками напівпровідника, одна з яких має електропровідність n -типу, а друга p -типу;

Електронно-електронний перехід (n - n^+ -перехід) – електричний перехід між двома ділянками n -типу, що мають різні значення питомої електричної провідності. Знаком (+) умовно позначають ділянку з вищою питомою електропровідністю;

Емітер (емітерна ділянка) – ділянка напівпровідникового приладу з високою питомою електричною провідністю, призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базову ділянку;

Енергетична зона – область значень повної енергії електронів у кристалі напівпровідника;

Епітаксія – процес нарощування монокристалічних шарів на основу конструкції структури. У нарощуваному шарі зберігається кристалічна орієнтація основи.

Ефективна маса носія заряду – величина, що має розмірність площі та зворотна добутку концентрації носіїв заряду даного типу в напівпровіднику на середній шлях, який проходять носії від вивільнення до захвату;

Заборонена зона – область значень енергії, які не можуть мати електрони в напівпровіднику;

Запірний шар – шар між двома напівпровідниками з різними типами електропровідності або між напівпровідником і металом, збіднений носіями заряду;

Зона провідності – вільна зона напівпровідника, на рівнях якої при збудженні можуть знаходитись електрони провідності;

Інжекція (вприскування носіїв заряду) – уведення під дією прямої напруги через зменшений потенціальний бар'єр носіїв заряду в ділянки, де вони є неосновними;

Коефіцієнт дифузії носіїв заряду – відношення щільності потоку рухливих носіїв заряду одного типу до градієнту їх концентрації при відсутності електричного та магнітного полів;

Кристал – періодично повторювані в просторі однакові елементарні структурні одиниці, тобто елементарні комірки кристалу, що складаються з одного (у найпростішому випадку) або декількох атомів кожна.

Елементарна комірка у загальному випадку має форму косокутного паралелепіпеда. Усі розташовані в ній атоми називають базисом елементарної комірки кристалу. Закономірності побудови елементарного осередку та базису, зокрема ступінь їх симетричності, визначає багато властивостей кристалу, у першу чергу електричні, магнітні, механічні.

Елементарна комірка може містити як один, так і кілька атомів. Так, у багатьох металів, наприклад, заліза, хрому, міді, срібла, вона складається з одного атома. У тих випадках, коли кристал складається з декількох хімічних елементів, наприклад, натрію і хлору, елементарна комірка буде містити як мінімум два атоми: натрій і хлор. Широко поширені кристали з елементарною коміркою, що складається з декількох зчеплених один з одним молекулярних груп (наприклад, кристали льоду) або ж багатьох магнітних матеріалів. Існують кристали, наприклад, білкові, елементарна комірка яких складається з молекул, що містять кілька тисяч атомів.

Кристалографічні площини. У кристалі велике значення мають *кристалографічні площини*, які проходять через вузли кристалічних решіток. Саме кристалографічні площини, на яких розташована велика кількість вузлів кристалічної решітки, важливі як для передбачення огранювання кристала, так і при розгляді руху часток у ньому. Кристалографічні площини описують індексами Міллера, тобто набором трьох цілих чисел, що вміщені у круглі дужки (*hld*). Знак мінус негативного індексу прийнято ставити над ним. Ці індекси мають простий геометричний сенс. Якщо уздовж трьох координатних осей, заданих векторами $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, відкласти відповідні відрізки з довжинами $a/h, b/k, c/l$ (рис. 1), то три точки однозначно зададуть площину (*hld*), яка проходить через них. На рис.2 показані площини (100), (200), (110), (110), (111). Паралельно зображених на рис. 1 площин можна провести багато рівнобіжних площин, які проходять через вузли кристалічних решіток, відкладаючи на осях відрізки з довжинами $na/h, nb/k, nc/l$ (n - ціле число). Відстань між такими найближчими площинами називається міжплощинною відстанню d_{hld} системи площин (*hld*). Величину d_{hld} зручно обчислювати як відстань від точки (000) до найближчої до неї площини *hld* (рис. 1). У кристалах із кубічною коміркою індекси Міллера площини збігаються з координатами напрямку вектора нормалі до неї, у випадку інших комірок це, як правило, не так.

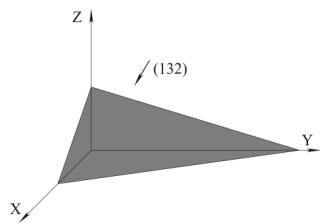
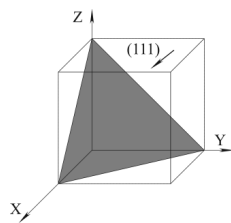
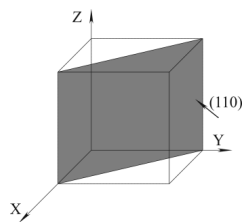
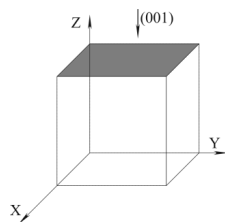
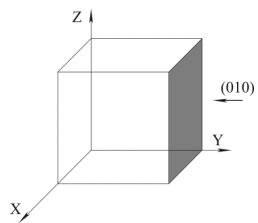
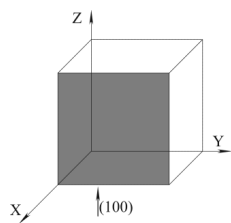
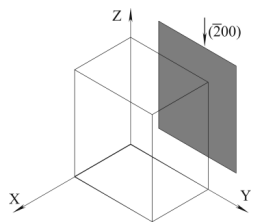
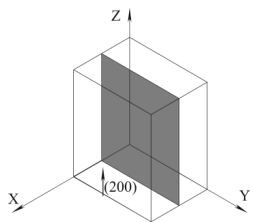
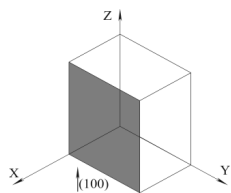


Рисунок 1 – Геометричний зміст індексів Міллера площини в кристалі



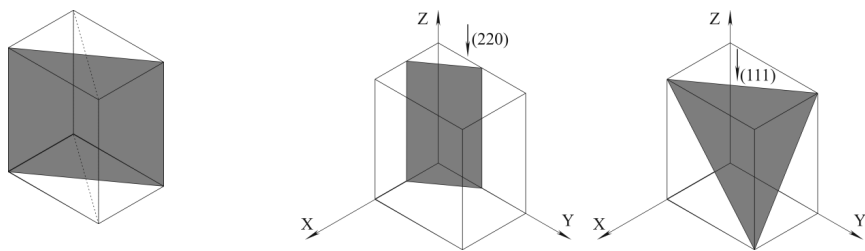


Рисунок 2 – Деякі кристалографічні площини кубічної решітки

Легування – процес керуваної зміни фізичних властивостей напівпровідника шляхом введення домішок у решітку кристала;

Легуючий елемент – хімічний елемент, атоми якого введені до решітки кристала для зміни його властивостей;

Міжзонна, або безпосередня, рекомбінація – проходить при переході вільного електрона із зони провідності у валентну зону на один із вільних енергетичних рівнів, що відповідає зникненню пари носіїв заряду – вільного електрона та дірки;

Монокристал – цільний кристал з разорієнтацією блоків не більш ніж на 1...2 градуси, який є трьохвимірним утворенням із тотожних елементарних центрів;

Напівпровідник – речовина, основною властивістю якої є сильна залежність її електропровідності від впливу зовнішніх факторів (під зовнішніми факторами розуміється температура, електричне поле, випромінювання та ін.). Для напівпровідників характерно експоненціальне зростання електропровідності при збільшенні температури. Питомий опір цих матеріалів знаходиться в діапазоні від 10^{-3} до $10^{10} - 10^{12}$ Ом·см;

Напрямок у кристалічних решітках задають координатами їхнього направляючого вектора в базисних векторах $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$, їх вказують у квадратних дужках. При цьому знак мінус у випадку негативних значень координат зображують над числом. Найбільш важливі напрямки задаються, як правило, цілими числами. На рис. 3 напрямок $[100]$ рівнобіжний ребру куба, напрямок

$[111]$ рівнобіжне просторовій діагоналі куба, а напрямки $[\bar{1}10]$ та $[110]$ – діагоналям його нижньої основи. Деякі напрямки в силу симетричності решітки, наприклад кубічної, фізично рівноцінні, наприклад $[110]$, $[101]$, $[011]$, $[\bar{1}10]$. Для опису такого сімейства напрямків використовують трикутні дужки $\langle 110 \rangle$.

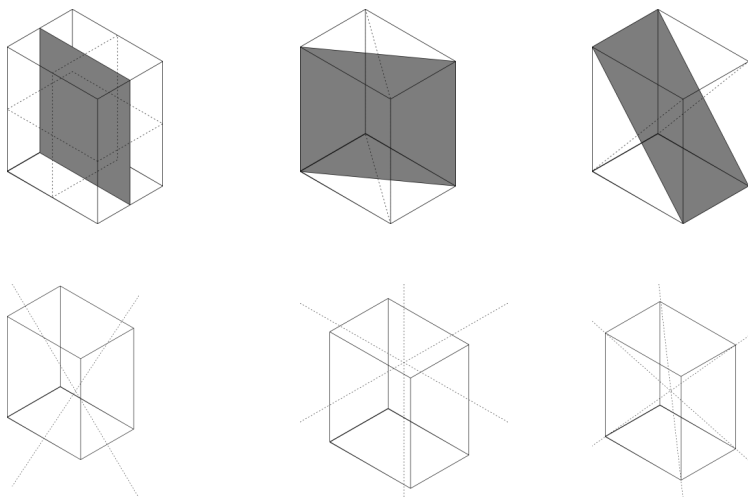


Рисунок 3 – Деякі елементи симетрії куба

а) три площини симетрії, які перпендикулярні ребрам куба; б, в) чотири з шести площин симетрії, які перпендикулярні діагоналям граней куба; г) дві з шести осей симетрії 2-го порядку, паралельні діагоналям граней куба, які проходять через середини протилежних ребер; д) три осі симетрії 4-го порядку, які перпендикулярні граням куба та проходять через їх центри; е) чотириосі симетрії 3-го порядку, які паралельні діагоналям куба, що проходять через його вершини;

Носій заряду – загальна назва рухливих часток або квазічасток, які несуть електричний заряд та спроможні забезпечувати протікання

електричного струму. Носіями заряду є, наприклад, електрон, протон, іон. Цей термін відноситься умовно також до дірки в напівпровіднику;

Перехід Шотткі – електричний перехід, утворений внаслідок контакту між металом і напівпровідником;

Площинний перехід – електричний перехід, у якому лінійні розміри, що визначають його площину, значно більші за товщину;

Поверхнева рекомбінація – різновид рекомбінації за участю рекомбінаційних пасток, що проходить на поверхні;

Потенціальний бар'єр – різниця потенціалів між двома сусідніми речовинами або однорідними ділянками з різними електричними властивостями, зумовлена дифузією носіїв заряду від кожної з ділянок і створенням зони об'ємного заряду;

Рекомбінація з участю рекомбінаційних пасток – відбувається у два етапи. На першому етапі рекомбінаційна пастка (або її енергетичний рівень) захоплює, наприклад, електрон з зони провідності. Таким чином електрон вибуває з процесу електропровідності. У цьому стані пастка буде знаходитись до тих пір, поки до неї не підійде дірка, тобто поки в даному місці кристалу не з'явиться вільний енергетичний рівень валентної зони. При дотриманні цих умов виконується другий етап рекомбінації – електрон переходить на вільний рівень валентної зони (що еквівалентно захвату дірки з валентної зони негативно зарядженої ловушки). Роль рекомбінаційних пасток можуть виконувати атоми або іони, що в домішках, різні включення в кристалі, незаповнені вузли кристалічної решітки, тріщини та інші недоліки об'єму або поверхні;

Рекомбінація носіїв заряду – зворотній процес генерації, тобто повернення електронів із зони провідності в валентну зону, у результаті чого зникає пара носіїв заряду;

Рівень Фермі – енергетичний рівень, імовірність заповнення якого дорівнює 0,5 за температур, що відмінні від температури абсолютного нуля;

Рухливість носіїв заряду – відношення середньої сталої швидкості

переміщення носіїв заряду в напрямку електричного поля до напруженості останнього;

Сонячна постійна – енергетичне опромінення E_s , що відповідає умовам сонячного опромінення платформи, розташованої по нормалі в напрямку Сонця та віддаленої від нього на відстань, яка дорівнює астрономічній одиниці (середня відстань від Землі до Сонця), тобто фактично умовам платформи, розташованої на межі між атмосферою Землі та космосом. Кутовий розмір Сонця при цьому складає $31'59''$. Таким чином, у кожену точку елементарної площадки, що освітлюється, надходить пучок променів, вміщений у конусі з кутом $\pm 16'$. Потік випромінювання ідеально однорідний. Сонячна постійна має значення 1360 Вт/м^2 .

Структурний дефект – викривлення решітки реального кристалу викликане порушенням правильної періодичності розташування атомів, яке не виправляється при зміні напруженого стану кристалу;

Термін життя нерівноважних носіїв заряду – відношення надлишкової концентрації нерівноважних носіїв заряду до швидкості зміни цієї концентрації через рекомбінацію. Термін життя нерівноважних носіїв заряду залежить від температури напівпровідника, від концентрації в напівпровіднику рекомбінаційних ловушок

Типи кристалічних решіток. Усе розмаїття кристалів може бути описане за допомогою 14 типів кристалічних ґрат (решітки *Браве*), зображених на рис. 4. Їх групують у сім систем, які розрізняються видом елементарної комірки: триклинну, моноклінну, ромбічну, тетрагональну, тригональну, гексагональну і кубічну. Кожна система має свої співвідношення між величинами a, b, c та α, β, γ . Деякі з цих решіток мають різновиди: примітивна – P , об'ємноцентрована (ОЦ) – I , гранецентрована (ГЦ) – F та з однією парою центрованих протилежних граней – C .

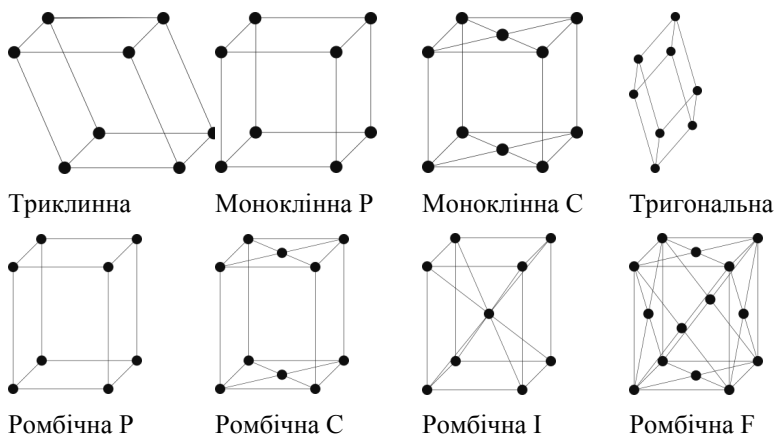


Рисунок 4 – Решітки Браве

1. У триклинній системі як усі кути, так і всі довжини сторін неоднакові. Така решітка має центр симетрії в центрі елементарної комірки.

2. У моноклінній системі комірка має форму прямої призми з ребрами різної довжини. Комірка може бути з центрованими *основами* прямої призми *С* та примітивної *Р*. У таких решіток додаються елементи симетрії: площина симетрії, рівнобіжні основи прямої призми та вісь обертання 2-го порядку, що проходить через середини *основ*.

3. У ромбічній системі комірка має форму прямокутного паралелепіпеда з ребрами різної довжини. Комірка має всі 4 типа: *Р*, *І*, *Е*, *С*. У такої решітки ще більше елементів симетрії: три площини симетрії, рівнобіжні граням, і три осі обертання 2-го порядку, які проходять через середини протилежних однакових граней.

4. У тетрагональній системі комірка має форму прямокутного паралелепіпеда з квадратною основою. Комірка може бути примітивною *Р* та ОЦ *І*. Порівняно з попередньою решіткою у неї з'являється вісь обертання 4-го порядку і кілька площин симетрії.

5. У кубічній системі комірка має форму куба. Комірка може бути з

центрованими гранями куба (ГЦК – гранецентрований куб) або центром (ОЦК – об'ємноцентрований куб)

6. У гексагональній системі комірка має форму прямої призми з ромбом в основі, причому кут у ромбі дорівнює 60° .

7. У тригональній системі комірку вибирають у виді ромбоедра, усі грані якого є однаковими ромбами з кутом при вершині $\neq 90^{\circ}$.

Точковий дефект – двовимірний дефект – закономірне відхилення від нормальної (яка відповідає типу симетрії) послідовності в розташуванні шарів атомів;

Точковий перехід – електричний перехід, усі розміри якого менші за характерну довжину, що визначає фізичні процеси в переході та на ділянках, що його оточують. Характерною довжиною може бути товщина ділянки об'ємного заряду, дифузійна товщина тощо;

Швидкість поверхневої рекомбінації – співвідношення щільності потоку носіїв заряду, рекомбінованих на поверхні напівпровідника до концентрації надлишкових носіїв заряду біля поверхні;

Ширина забороненої зони – розбіжність енергій між нижнім рівнем зони провідності та верхнім рівнем валентної зони напівпровідника;

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Antonova V. A. Comprehensive optimization of the frontal structure elements of solar cells for space application / V. A. Antonova, V. N. Borshev, V. R. Kopach, N. P. Klochko, A. M. Listraenko // International Workshop “Physical Aspects of the Luminescence of Complex Oxide Dielectrics” (LOD’2002). – Lviv, 2003. – № 1. – P. 168 – 175.
2. Bomfleur B. Dünnschichtzellen werden bezahlbar / B. Bomfleur // Erneuerbare Energ. – 2003. – № 2. – S. 4 - 5.
3. Brodsky M.N., Cardona M., Cuomo J.J. Infrared and Raman Spectra of the Silicon-Hydrogen Bonds in Amorphous Silicon Prepared by Glow discharge and sputtering // Phys. Rev. B. – 1977. – V. 16, № 8. – P. 3556–3581
4. Burger R. Paper-thin PV cells / R. Burger // Refocus. – 2004. – Jan-Febr. – P. 10.
5. Carr A. A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates / A. Carr // Sol. Energy. – 2004. – № 2 - 3. – P. 285 - 294.
6. Conti S. Optimal sizing procedure for stand - alone photovoltaic system by fuzzy logic / S. Conti, G. Tina, C. Ragusa // Trans. ASME. J. Sol. Energy Eng. – Catania: Universta di Catania, 2002. – № 1. – P. 77 - 88.
7. Dumke D. Innovative solar panels many test challenges / D. Dumke, G. von Kurt // Sound and Vibr. – 1997. – № 10. – P. 6 - 10.
8. Ellis G. Sechs-ZollModule von Aleo und Total / G. Ellis // Sonne Wind und Wärme. – 2003. – № 6. – S. 74.
9. Faiman D. Inorganic benchmarks for organic solar cells: considerations of efficiency, stability and cost / D. Faiman // SPIE Conference on „Organic Photovoltaics II”. – San Diego, Calif.:Ben - Gurion University of the Negev, Israel, Proc. SPIE., 2001. – № 65. – P. 1 - 12.
10. Gareth E. Australian JV develops low-cost solar cells / E. Gareth // Power Eng. Int., – 2003. – № 1. – P. 11.

10. Gassel A. Neuheiten für Photovoltaik-anagen / A. Gassel // DE: Elektro- und Gebäudetechn. – 2002. – № 15 - 16. – S. 68 - 70.
11. Gaudiana R. DEY sensitized titania photovoltaic cells on flexible substrates-concept to commercialization / R. Gaudiana // Macromol. Sci. – 2002. – №10. – P. 1259 - 1264.
12. Gaudiana R. Panneaux solaires: Ils s'affranchissent enfin du silicium / R. Gaudiana // Sci. et vie. – 2004. – № 1039. – P. 79 - 81.
13. Gruber D. - P., Spatial distribution of light absorption in organic photovoltaic devices / D. - P. Gruber, G. Meinhardt, W. Papousek // Sol. Energy. – 2005. – № 6. – P. 697 - 704.
14. Hiroshi H. Effect of illumination conditions on Czochralski-grown silicon solar cell degradation / H. Hiroshi, I. Yu, S. Tadashi // J. Appl. Phys. – 2003. – № 7. – P. 4240 - 4245.
15. <http://www.solarbat.info/raschet-fotoelektricheskoi-sistemi>
16. Iles P. F. Evolution of Silicon Solar Cell Design / P. F. Iles // Specialists Conf., Silver Spring, Md. – New York, 1972. – № 5. – P. 92 - 99.
17. Kerr M.- J. Generalized analysis of the illumination intensity vs. open-circuit voltage of solar cells / M.- J. Kerr, A. Cuevas // Sol. Energy. – 2004. – № 2 - 3. – P. 263 - 267.
18. Klebtechnik A. Solardach von der Rolle nicht ohne / A. Klebtechnik // Kleben und Dichten. – 2007. – № 3. – S. 10.
19. Klempert O. DREI Modultypen aus Japan / O. Klempert // Sonne Wind und Wärme. – 2004. – № 7. – S. 32.
20. Knacub G. Solar-Experimente auf der Weltraumstation ISS / G. Knacub // Sonne Wind und Wärme. – 2001. – № 4. – S. 8.
21. Knaupp W. Kostengünstige und flexible CIS-Photovoltaik / W. Knaupp // Galvanotechnik. – 2004. – № 1. – S. 187.
22. Knaupp W. Solarstrom modul mit 218 Wp / W. Knaupp // DE:Elektro- und Gebäudetechn. – 2003. – № 17. – S. 85.

23. Krebs F. - C. Dye sensitized photovoltaic cells: attaching conjugated polymers to zwitterionic ruthenium dyes./ F. - C. Krebs, M. Biancardo // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. – 2006. – № 2. – P. 142 - 165.
24. Lehmann K.-P. Gekühltes PV=Modul / K.-P. Lehmann // Sonne Wind und Wärme. – 2004. – № 4. – S. 67.
25. Lehmann K.-P. Aleo-Module bis 215 Wp / K. - P. Lehmann // Sonne Wind und Wärme. – 2004. – № 2. – S. 61.
26. Lehmann W.- M. Photovoltaik – neue Horizonte / W.-M. Lehmann // ew: Elektrizitätswirt. – 2004. – № 1 - 2. – S. 59 - 60.
27. Lindmayer J. The violet cell: an improved silicon solar cell / J. Lindmayer, J. F. Allison // Conf. Rec. 9th IEEE photovoltaic spec. conf. IEEE. – N.Y., 1972. – P. 83 - 96.
28. Mandelkorn J. Simplified fabrication of back surface electric field silicon solar cells and novel characterizes of such cells / J. Mandelkorn, J. H. SR. Lamneck // Conf. rec. 9th IEEE photovoltaic spec. conf., IEEE. – 1972. – P. 66 - 72.
29. Matthias H. Vertrauensbildende Nabnahmen / H. Matthias, H. Björn. // Sonne Wind und Wärme. – 2003. – № 8. – S. 58 - 59.
30. Oliver K. Space solar cells may add power to earth / K. Oliver // In Nech. – 2003. – № 36. – P. 16.
31. Oliver K. Ausgebaute Fertigung / K. Oliver // TAB: Techn. Bau. – 2003. – № 7 - 8. – S. 371.
32. Oliver K. Neues Solarmodul / K. Oliver //DE: Elektro-und Gebäudetechn. – 2003. – № 8. – S. 1.
33. Ruan O'H. A parametric study of TiO₂/CuInS₂ nanocomposite solar cells: how cell thickness, buffer layer thickness, and TiO₂ particle size affect performance. / O'H. Ruan, M. Marian, J. Schoonman, A. Goossens // Nanotechnology. – 2007. – № 5. – P. 57 - 67.
34. Sciubba E. Cost analysis of energy conversion system via a novel resource-based quantifier / E. Sciubba // Energy (Gr. Brit.). – 2003. – № 5. – P. 457 - 477.

35. Solanki C.S. Transfer of a thin silicon film on to a ceramic substrate / C. S. Solanki, R. R. Bilyalov, J. Poortmans, J. Nijis // *Thin Solid Films*. – 2002. – № 403 - 404. – P. 34 - 38.
36. Spear W.E., Lecomber P.G. Electronic Properties of Substituted Doped Amorphous Si and Ge // *Phys. Mag.* – V. 33. – 1976. - P. 935-949.
37. Stryi-Hipp G. Durchbruch bei organischen Solarzellen / G. Stryi-Hipp // *Atp: Automatisierungstechn. – Prax.*, 2004. – № 3. – S. 19.
38. Tatsuya S. Plasma treatment on electrode surfaces of bifacial silicon solar cells. / S. Tatsuya, S.-Y. Moon, M. Kunihiro // *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*. – 2006. – № 7 - 8. – P. 1089 - 1097.
39. Torchynska T. V. III-V material solar cells for space application / T. V. Torchynska, G. P. Polupan // *Semicond. Phys., Quantum Electron. and Optoelectron.* – 2002. – № 1. – P. 63 - 70.
40. Werner K. Neues Solarmodul von Conergy / K. Werner // *Sonne Wind und Wärme*. – 2004. – № 7. – S. 32.
41. Werner K. Wirtschaftlichkeits-berechnung / K. Werner // *Sonne Wind und Wärme*. – 2004. – № 7. – S. 36.
42. Wiesel M. Solarzellen mit höherem Wirkungsgrad / M. Wiesel // *Galvanotechnik*. – 2004. – № 3. – S. 693.
43. Wieser M. Multikristalline Kleinmodule / M. Wieser // *Sonne Wind und Wärme*. – 2003. – № 1. – S. 53.
44. Yamaguchi M. An investigation of experience curves of solar photovoltaic power system / M. Yamaguchi, O. Sato // *JAERI - Rev.* – 2002. – № 2005. – P. 115 - 117.
45. Yuting W. Qinghua daxue xuebao / W. Yuting, Z. Hongye, R. Jianxun, L. Xingang // *Ziran kexue ban = J. Tsinghua Univ. Sci. and Technol.- Beijing University of Technology*. – Beijing, 2003. – № 8. – P. 1052 - 1055.
46. Zanzucchi J. A new amorphous silicon-based alloy for electronic applications / J. Zanzucchi, C.R. Wronski, D.E. Carlson // *J. Appl. Phys.* – 1977. – V. 48. P. 5227.

47. А.с. № 1274032 Российская Федерация, МКИ³ В 25 J 15/00. Способ определения коэффициента полезного действия солнечных элементов / А. М. Демченко, А. Е. Романовский (Россия). – № 3360585/25–00; заявл. 23.11.00; опубл. 30.03.01, Бюл. № 12.

48. Автономов В. Н. Создание современной техники: основы теории и практики / В. Н. Автономов. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.

49. Амбросяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов./ Амбросяк А. пер. с польского под ред. Б. Т. Коломийца. – М.: Советское радио, 1970. – 392 с.

50. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

51. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / Ансельм А. И. – М.: Наука, 1978. – 616 с.

52. Арипов Х. К. Закономерности формообразования вольтамперных характеристик солнечных элементов с распределенными параметрами / Х. К. Арипов, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т.17, № 2. – С. 358 - 361.

53. Арипов Х. К. Расчет вольтамперных характеристик солнечных элементов с распределенными параметрами / Х. К. Арипов, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 1981. – Т. 15, № 4. – С. 667 - 675.

54. Баранский П.И. Полупроводниковая электроника: справочник / П.И. Баранский, В.П. Ключков, И.В. Потыкевич – Киев: Наукова думка, 1975, – 704 с.

55. Безручко К. В. Автономные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии / К. В. Безручко, С. В. Губин. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-т”, 2007. – 310 с.

56. Безручко К. В. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / [К. В. Безручко, Н. В. Белан,

Д. Г. Белов, С. В. Губин и др.]; под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т „Харьк. авиац. ин-т”, 2000. – 515 с.

57. Беляев Ю. М. Повышение эффективности использования наземных фотоэлектрических систем / Ю. М. Беляев, А. С. Нагайкин, Ю. В. Разгоняев // Гелиотехника. – Ташкент: ФАН, 1989. – №2. – С. 6 - 10.

58. Веденеев Г. М. Полупроводниковые системы электроснабжения космических летательных аппаратов / Г. М. Веденеев, Ф. Ф. Галтеев, В. Г. Еременко, А. Б. Токарев. – М.: МЭИ, 1986. – 92 с.

59. Гаспарян Ф. В. Кремниевые фотоприемники / Гаспарян Ф. В., Адамян Э. Н., Арутюнян В. М. – Ереван: Ереванский университет, 1983. – 360 с.

60. Гительман Л. Д. Эффективная энергокомпания // Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – М.: 2002. – 276 с.

61. Грилихес В. А. Солнечные космические энергостанции / Грилихес В. А.. – Л.: Наука, 1989. – 182 с.

62. Заявка 1548868 ЕПВ, МПК⁷ Н 01 М 14/00, Н 01 L 31/04. Fujikura Ltd, Matsui Hiroshi. Electrode substrate, photoelectric conversion element, conductive glass substrate and production method thereof, and pigment sensitizing solar cell / O. Kenichi, K. Takuu, T. Nobuo, E. Tetsuya. – № 037587110; заявл. 03.10.2003; опубл. 29.06.2005, Бюл. № 21.

63. Заявка 2822436 Франция, МПК⁷ В 64 G 1/44, Н 01 L 31/042 Panneau solaire ayant des bornes electriques reparties sur sa surface / Boulanger B. (Франция). – № 0103822; заяв. 21.03.2001; опубл. 27.09.2002, Бюл. № 12.

64. Заявка 2838564 Франция, МПК⁷ Н 01 L 31/042 Generateur photovoltaïque a concentration protégé contre l'échuffement / J. Ransquin, L. D'Abriageon (Франция). – № 0204528; заяв. 11.04.2002; опубл. 17.10.2003, Бюл. № 14.

65. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С. Зи. – Кн.1. – М.: Мир, 1984.– 456 с.

66. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С. Зи. – Кн.2. – М.: Мир, 1984.– 456 с.
67. Киреев В.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1975. – 584 с.
68. Колобаев В. В. Исследование тонкопленочных структур на основе CdTe и их применение в солнечных батареях: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 01.04.21. „Оптика, лазерная физика” / В. В. Колобаев. – М., 2001. – 19 с.
69. Колтун М. М. Солнечные элементы / Колтун М. М. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
70. Концевой Ю.Я. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Концевой Ю.Я., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. // М.: Радио и связь, 1982. – с.239
71. Коутс Т. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики / [Т. Коутс, Дж. Микин и др]; пер. с англ. Фонаш С., Роворф А., Казмерски Л. – М.: Мир, 1988. – 307 с.
72. Кудрин О. И. Солнечные высокотемпературные космические энергетические установки / Кудрин О. И. – М.: Машиностроение, 1987. –248 с.
73. Куландин А. А. Энергетические системы космических аппаратов / Куландин А. А., Тимашев С. В., Иванов В. П. – М.: Машиностроение, 1979. – 320 с.
74. Лазарев Л.П. Оптико -електронні прилади наведення. - М. : Машинобудування , 1989 . – 516 с.
75. Лебедев А. А. Основы синтеза систем летательных аппаратов / [А. А. Лебедев, В. Н. Баранов, В. Г. Бобровников и др.]; под ред. А. А. Лебедева. – М.: Машиностроение, 1987. – 324 с.
76. Макарова Е.А. Потік сонячного випромінювання / Е.А. Макарова, А.В. Харитонов, Т.В. Казачевская - М.: Наука. Гол. ред фіз- мат. літ. 1991. – 400 с.

77. Марченко А.Н. Управляемые полупроводниковые резисторы. М.: Энергия, 1978. – 216 с.
78. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников/ М.Г. Мильвидский, В.Б. Освемский –М.:Металлургия, 1984 – 256 с.
79. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных возобновляемых источников. Опыт перспективы / Н. М. Мхитарян. – К.: Наукова думка, 1999. – 308 с.
80. Надежность и эффективность в технике: справочник / [под ред. А. И. Рембезы]. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
81. Накашидзе Л. В. Методология определения архитектурного облика солнечных батарей / Габринец В. А., Накашидзе Л. В. и др. // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно - космічна техніка. – Вип. 10. – Дніпропетровськ, 2006. – Т. 2, № 9/2. – С. 108 - 116.
82. Накашидзе Л. В. Снижение стоимости энергогенерирования солнечных фотоэнергетических установок / Л. В. Накашидзе // Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал. – Харьков: ХАИ, 2007. – № 7 (43). – С. 108 - 116.
83. Нарсубаев А. А. Введение в теорию обоснования проектных решений / Нарсубаев А. А. – Л.: Судостроение, 1976. – 220 с.
84. Наумов В. В. Методика автоматизированного измерения и расчета электрофизических параметров СЭ / В. В. Наумов, О. А. Гребенщиков, В. Б. Залесский // Ж. прикл. спектроскопии. – Минск: Институт электроники НАН Беларуси, 2002. – № 5. – С. 671 - 674.
85. Островский В. Эксплуатационные испытания гелиокомплекса в центральных Каракумах / В. Островский, Е. Егенназаров, П. Хайдаров, Г. Шаймердакулыев // Гелиотехника. – Ташкент: ФАН, 1990. – № 5. – С. 5 - 8.
86. Охотин А.С. Теплопроводность твердых тел: Справочник / А.С. Охотин, Р.Л. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский: Под ред. А.С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

87. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М.: Высшая шк., 1987. – 479 с.

88. Пат. 2200115 Российская Федерация, МПК⁷ В 64 G 1/44 Солнечная батарея космического аппарата / В. Н. Бранец, А. М. Вовк, Б. А. Соколов и др.; заявитель и патентообладатель ОАО „Ракетно-космическая Корпорация «Энергия»”. – №201114567/28; заяв. 28.05.2001; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 33 (II ч.).

89. Пат. 5620526 США, МКИ⁶ H 01 L 31/045 Low disturbance solar array / F. Samir, M. Baassily, F. Stuart, G.N. Young; заявитель и патентообладатель Hughes Electronics. – № 552811; заяв. 03.11.95; опубл. 15.04.97, Бюл. № 1.

90. Пат. 6177627 США, МПК⁷ H 01L 25/00 Solar cell array with multiple rows of cells and collapsible reflectors / M. Dave, M. Eskenazi, B. Spence; заявитель и патентообладатель ACE-Able Engineering Co., Inc. – № 09/337624; заяв. 21.06.1999; опубл. 23.01.2001, Бюл. № 22 (II ч.).

91. Пат. 6262358 США МПК⁷ H 01 L 31/048 Solar cell module and solar cell panel using the same / K. Kunio, S. Keiji, M. Toshinobu, S. Tatsuo; заявитель и патентообладатель Sharp K. K. – № 09/504101; заяв. 14.02.2000; опубл. 17.07.2001, Бюл. № 24.

92. Попов А.И. Кремний и германий в полупроводниковом приборостроении/ Плплв А.И., Михалев Н.И., Под ред В.А. Филиклва, М.: Моск. энерг. Ин-т, 1989 – 120 с.

93. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Попырин Л. С. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.

94. Расулов Д.Т. Исследование фотоэлектрических свойств пленочных полупроводниковых структур на основе CuInSe₂/Д.Т. Расулов, С.А.Алибеков// Гелиотехника. – №2. – 2004

95. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.

96. Семиноженко В. П. Энергия. Экология. Будущее / В. П. Семиноженко, П. М. Канило, В. Н. Остапчук, А. И. Ровенский. – Харьков: Прапор, 2003. – 256 с.
97. Смит Р.А. Полупроводники: пер. с англ. /ред Н.А. Пеннин, М.: Мир, 1982. –560 с.
98. Соустин Б. П. Системы электропитания космических аппаратов / [Соустин Б. П., Иванчура В. И., Чернышев А. И., Исляев Ш. Н.]; под ред. акад. РАН М. Ф. Решетнева. – Новосибирск: ВО „Наука”. Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.
99. Стриха В. И. Солнечные элементы на основе контакта металл-полупроводник / В. И. Стриха, С. С. Кильчицкая. – СПб.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
100. Таблицы физических величин. Справочник / ред. И.К. Кикоин. М.: Атом издат, 1976. – 1008 с.
101. Тверьянович Э. В. Оптико-концентрирующие системы для солнечных электростанций / Э. В. Тверьянович // Гелиотехника. – Ташкент: ФАН, 1989. – № 3. – С. 18 - 21.
102. Тверьянович Э. В. Фотоэлектрические модули с концентраторами / Э. В. Тверьянович, Е. А. Красина, А. В. Романкевич // Гелиотехника. – Ташкент: ФАН, 1990. – № 2. – С. 69 - 74.
103. Токарев А. Б. Сравнительный анализ структурных систем энергопитания повышенного напряжения для космических аппаратов / А. Б. Токарев, С. П. Шпаков // Электрооборудование автономных объектов. – М., 1987. – С. 31 - 35.
104. Туркин И. Б. Теоретически и экспериментальные основы создания средств, моделей и методов для испытаний солнечных энергоустановок космических аппаратов: автореф. дис. на соискание научной степени д-ра техн. наук: спец. 07.05.07. „Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов” / И. Б. Туркин. – Харьков, 2002. – 23 с.

105. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.:Наука, 1977. – 368 с.
106. Фаренбрух А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб; пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
107. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ, справочник/ под ред. А.В. Новоселова., В.Б. Лазарев – М.:Наука, 1979. – 340 с.
108. Физический энциклопедический словарь/ Под ред. А.М Прохоров. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 928 с.
109. Чопра К. Тонкопленочные солнечные элементы/К. Чопра, С. Дас. – М.:Мир, 1986. – 435 .
110. Шаламова К.В. Физика полупроводников –М.:Энергия, 1976. – 384 с.
111. Шварц М. З. Экспериментальные методы исследования характеристик гетероструктурных солнечных элементов и фотоэлектрических модулей с концентраторами излучения: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ-мат. наук: спец. 01.04.21. „Оптика, лазерная физика” / М. З. Шварц. – СПб, 2003. – 23 с.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АМ	– атмосферна маса
ККД	– коефіцієнт корисної дії
ВАХ	– вольтамперна характеристика
ОПЗ	– область об'ємного заряду
К	– коефіцієнт концентрації сонячного випромінювання
E_f	– максимальна енергетична освітленість сприймаючої поверхні системи концентрування
φ_k	– кут розкриття системи концентрування сонячного випромінювання
В	– енергетична яскравість випромінювання
p	– тиск повітря в даній точці поверхні Землі
θ	– кут, що визначає висоту Сонця над лінією горизонту
m	– повітряна маса улюбій точці земної поверхні
L	– дифузійна довжина
D	– коефіцієнт дифузії
t	– термін життя носіїв заряду
E_c	– енергетичне опромінення
T	– температура
n	– концентрація носіїв заряду в напівпровіднику з власною електропровідністю
μ_n	– рухливість електронів ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$)
μ_p	– рухливість дірок ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$)
R	– коефіцієнт відбивання
n	– показник переломлення
n_χ	– показник поглинання
Ср	– теплоємність, Дж/(моль · град)
α	– температурний коефіцієнт лінійного розширення (10^{-6} , град $^{-1}$)
λ	– теплопровідність, Вт/(м · град)
C	– коефіцієнт жорсткості, ГПа

S	– коефіцієнт пружної піддатливості, 10^{-3} , ГПа
σ_p	– питома фотопровідність
H	– інтенсивність випромінювання
μ_{dn}	– дрейфова рухливість електронів
μ_{dp}	– дрейфова рухливість дірок
d	– товщина просвітлювального прошарку на поверхні сонячного елемента
$\lambda_{\max}$	– довжина хвилі, за якої фоточутливість досягає максимуму
E_g	– ширина забороненої зони
R_H	– проєднаний опір навантаження
U_{xx}	– напруга холостого ходу
R_H	– зовнішнє навантаження
I_ϕ	– фотострум
I_D	– струм прямозміщеного р-п-переходу
I_0	– зворотний струм насичення р-п-переходу
q	– заряд електрона, Кл
T	– абсолютна температура, К
k	– стала Больцмана, $(1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К})$
U	– напруга, В
$R_{ш}$	– шунтуючий опір
P	– вихідна потужність
ξ	– коефіцієнт заповнення вольтамперної характеристики
I_0	– зворотній струм насичення
E_o	– значення ЕРС термопар при освітленні сонячного елемента
E_m	– ЕРС термопар при нагріві сонячного елемента від зовнішнього джерела
I_m	– струм при нагріві сонячного елемента від зовнішнього джерела
V_m	– напруга при нагріві сонячного елемента від зовнішнього джерела
P_o	– максимальна потужність, яку генерує сонячний елемент при освітленні

- P_m – потужність, що розсіює сонячний елемент при його нагріванні від зовнішнього джерела струму
- $I_{к.з.}$ – сила струму короткого замикання
- U_{xx} – напруга холостого ходу
- P_{max} – максимальна потужність сонячного елемента
- U_{opt} – напруга у точці максимальної потужності
- I_{opt} – сила струму у точці максимальної потужності;
- U_{xx} – напруга холостого ходу, В;
- $I_{к.з.}$ – струм короткого замикання, А.
- η – коефіцієнт корисної дії сонячного елемента
- E – щільність потоку випромінювання
- U_{opt} – потужність, сонячного елемента у робочій точці, В;
- I_{opt} – сила струму при максимальній потужності (у робочій точці), А;
- S – площа вимірюваного сонячного елемента, м²;
- $P_{пит.}$ – питома потужність сонячного елемента
- $R_{п}$ – послідовний опір
- $R_{ш}$ – шунтуючий опір
- I – струм у ланцюзі сонячного елемента
- V – напруга на сонячному елементі;
- e – елементарний заряд;
- k – постійна Больцмана,
- T – температура.
- (I_N, V_N) і (I_{N+1}, V_{N+1}) – дві пари послідовно вимірюваних значень струму і напруги сонячного елемента в області високих V
- $I_{ф}$ Фотострум
- I_0, A, A^* – параметри вольтамперної характеристики контакту, які визначаються механізмами проходження струму та параметрами напівпровідникової структури.
- ΔV – ефективне зниження напруги на послідовному опорі;
- I – щільність струму, що протікає в сонячному елементі;

- ρ_s – питомий опір напівпровідника;
- D – товщина оптичного вікна;
- B – відстань між полосами контактної сітки;
- W – ширина полоси контактної сітки;
- ρ_f – питомий опір металу, з якого виготовлена контактна сітка;
- h – висота (товщина) полоси контактної сітки;
- $2a$ – довжина полоси контактної сітки;
- R_c – перехідний опір контакту метал-напівпровідник;
- I_o – зворотний струм насичення діода;
- A – коефіцієнт ідеальності вольтамперної характеристики, тобто діодний коефіцієнт (для кремнієвих сонячних елементів $A = 1 \div 2$);
- I – струм у ланцюзі сонячного елемента;
- V – напруга на клеммах сонячного елемента
- R_c – опір шарів фронтальної області p-n переходу сонячного елемента
- R_k – контактний опір сонячного елемента
- R_m – опір металевої доріжки контактної сітки сонячного елемента
- ρ – питомий опір фронтальної області сонячного елемента, Ом·см
- r_c – питомий опір шару фронтальної області сонячного елемента, Ом/□;
- r_k – питомий контактний опір сонячного елемента, Ом·см²;
- r_m – погонний опір металевих контактних смужок сонячного елемента, Ом·см⁻¹
- ω – товщина фронтального шару сонячного елемента
- l_3 – ширина контактних металевих смужок сонячного елемента
- l_1 – крок між контактними металевими смужками сонячного елемента
- l_2 – розмір вимірюваного зразка сонячного елемента
- V_1 – зниження напруги
- V_2 – напруга, виміряна між середніми контактними доріжками при

тому же значенні струму I .

- ρ – питомий опір фронтального шару
- V_c – середня яскравість сонячного випромінювання в межах тілесного кута
- ψ_c – видимий кутовий радіус Сонця
- K_{gr} – граничний коефіцієнт концентрації
- K_r – геометричний коефіцієнт концентрації
- K_e – енергетичний коефіцієнти концентрації
- K_c – коефіцієнт концентрації системи концентрування сонячного випромінювання
- E – щільність потоку спадаючого випромінювання
- U_{opt} – потужність, сонячного елемента у робочій точці, В;
- I_{opt} – сила струму при максимальній потужності (у робочій точці), А
- S – площа вимірюваного сонячного елемента, m^2 ;
- η – коефіцієнт корисної дії.
- $P_{пит}$ – питома потужність сонячного елемента
- E – сонячна радіація
- $D_{пр}$ – пряма сонячну радіація
- $D_{диф}$ – дифузійна сонячна радіація
- $E_{ГП}$ – сонячна енергія, що надходить на горизонтальну поверхню
- $E_{ВП}$ – сонячна енергія, що надходить на вертикальну поверхню
- h_0 – висота сонця, тобто кут між горизонтальною поверхнею та напрямком на сонце;
- A_0 – азимут сонця;
- $A_{ВП}$ – азимут вертикальної поверхні
- Ψ_c – коефіцієнт сонячного сйва
- i_a – альбедо
- E_m – максимальне (на 12 годину дня) значення сонячної радіації $Вт/м^2$;
- E – поточне значення сонячної радіації $Вт/м^2$;
- τ – поточний час, що відрховується з моменту сходу сонця, год.;

τ_c	– тривалість світлового дня, год.
Δt	– проміжок часу надходження сонячного випромінювання
E_{cp}	– середнє значення інтенсивності сонячної радіації
β_{np}	– кут встановлення енергосприймальної поверхні
σ_0	– нахил Сонця
m_g	– порядковий номер дня в році
φ	– широта місцевості
$\omega_{згп}$	– кут заходу Сонця для горизонтальної поверхні, град
$\omega_{зпп}$	– кут заходу Сонця для похилої поверхні
$\chi_{пр}$	– коефіцієнт, який враховує вплив кута установки похилої поверхні на добове сприйняття прямої радіації
H_c	– істинний сонячний час
$H_{п}$	– поясний час
Φ_a	– азимутальний кут знаходження Сонця, що вимірюється у горизонтальній площині у напрямку з півночі на південь;
Φ_e	– кут підвищення Сонця, що вимірюється у вертикальній площині;
$L_{ш}$	– географічна широта точки розташування спостерігача;
δ	– кут схилу Сонця
h	– годинний кут Сонця
H_{co}	– тривалість сонячного освітлення
$L_{ш}$	– географічна широта точки розташування спостерігача
δ	– кут схилу Сонця
Φ_a	– азимутальний кут знаходження Сонця, що вимірюється у горизонтальній площині у напрямку з півночі на південь;
Φ_e	– кут підвищення Сонця, що вимірюється у вертикальній площині;
α	– кут нахилу батареї
Φ_α	– азимутальний кут
Γ	– сумарний кут між напрямком на Сонце та нормаллю до площини сонячної батареї:

ЗМІСТ

Передмова	2
Терміни та визначення	4
Глава 1	16
Перетворювання сонячного випромінювання в електричну енергію	
1.1. Показники, що визначають технічний рівень систем енергозабезпечення	16
1.2. Структура та основні конструктивні елементи сонячних фотоелектричних установок	18
1.3. Напрями вдосконалення фотоелектричних систем енергозабезпечення	27
1.3.1. Шляхи удосконалення окремих вузлів сонячних фотоелектричних установок	27
1.3.2. Шляхи удосконалення технології виробництва конструктивних елементів сонячних фотоелектричних установок	30
1.3.3. Врахування взаємного впливу конструктивних елементів сонячних фотоелектричних установок	36
Глава 2	41
Матеріали для сонячних елементів	
2.1 Монокристалічний кремній	41
2.1.1 Основні властивості монокристалічного кремнію	41
2.1.2 Оптичні властивості монокристалічного кремнію	44
2.1.3. Механічні властивості монокристалічного кремнію	47
2.2. Аморфний кремній	49
2.2.1 Основні властивості аморфного кремнію	50
2.2.2 Оптичні властивості аморфного кремнію	51
2.2.3 Електричні властивості аморфного кремнію	52
2.2.4. Рухливість та термін життя носіїв заряду аморфного кремнію	53

2.3. Селенід міді та індію (CuInSe_2)	53
2.3.1. Електричні властивості селеніду міді та індію	54
2.3.2. Оптичні властивості селеніду міді та індію	54
Глава 3	55
Конструкція сонячного елемента	
Глава 4	60
Методи вимірювання систем перетворювання сонячної енергії в електричну	
Лабораторна робота № 1	60
Вольтамперна характеристика сонячних елементів	
Лабораторна робота № 2	73
Визначення послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента	
Лабораторна робота № 3	78
Експрес-оцінка послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента	
Лабораторна робота № 4	84
Визначення контактного опору сонячного елемента	
Лабораторна робота № 5	88
Чотирьохконтактний метод визначення складових послідовного опору	
Лабораторна робота № 6	92
Спектральна чутливість сонячних елементів	
Лабораторна робота № 7	97
Вплив систем концентрації сонячного випромінювання на енергетичні параметри сонячних елементів	
Лабораторна робота № 8	107
Відбір сонячних батарей для формування сонячної фотоелектричної установки	
Список використаної літератури	126
Список скорочень	137

Наукове видання

**НАКАШИДЗЕ Лілія Валентинівна
ГАБРИНЕЦЬ Володимир Олексійович
МІТКОВ Юрій Олексійович**

ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Навчальний посібник
(Українською мовою)*

Видання друкується в авторській редакції

Коректор української мови: Накашидзе І. С.

Здано у видавництво 29.03.2016. Підписано до друку 14.04.2016.
Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Academy. Друк
офсетний. Умовн. друк. арк. 8,49. Наклад 300 прим. Зам. № 9355

Видано та віддруковано в ТОВ «Акцент ПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*