1.1 Структура сонячного елементу

Кремній – найбільш вивчений напівпровідниковий матеріал, а виготовленні з нього сонячні елементи на основі гомогенного p-n переходу є найпростішими фотоелектричними перетворювачами.

Сонячні елементи мають порівняно просту будову. Перш за все, в сонячних елементах є задній контакт і два шари кремнію різної провідності. Зверху знаходиться сітка, яка складається з металевих контактів і антиблікового покриття.

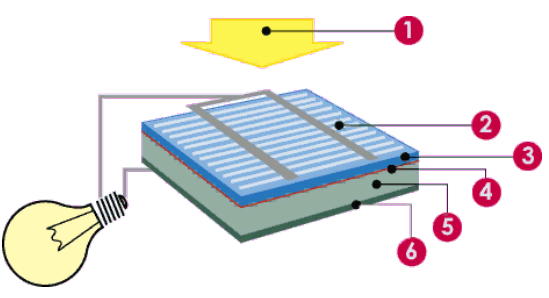


Рис.1. Структура сонячного елементу. 1 - світло (фотони), 2 - передній контакт, 3 – шар з електронною провідністю, 4 – перехідний шар, 5 – шар з дірковою провідністю, 6 – задній контакт.

Принцип роботи сонячних елементів добре відомий. Він полягає в ефекті напівпровідників: коли нагрівається верхня кремнієва пластина блоку перетворювача, електрони з атомів кремнію звільнюються, після цього їх захоплюють атоми нижньої пластини. Електрони прагнуть повернутися в своє початкове положення, як наслідок, з нижньої пластини електрони рухаються по провідникам, які віддають свою енергію на зарядку акумуляторів і повертаються на верхню пластину.

1.2 Одно-діодна модель

Фотоелектричні системи (ФЕ) безпосередньо перетворюють сонячне світло в електрику. Як правило, фотоелементи з’єднуються послідовно або паралельно, щоб сформувати так званий фотоелектричний модуль.

Безумовно, найпростішою моделлю для опису фотоелектричних модулів є одно-діодна модель, де вихід джерела струму безпосередньо пропорційний світлу, що падає на панель. Ця модель повністю характеризує тільки три параметри в вольт-амперній характеристиці: Струм короткого замикання , напругу холостого ходу , і фактор ідеальності діода . По суті, одно-діодна модель не дає повного уявлення про сонячний елемент якщо на нього впливає навколишнє середовище, особливо при малій напрузі. Теорія сонячних елементів завжди передбачає електрично однорідний елемент. Густина цього елементу в ідеальному випадку описується рівнянням діода Шоклі [25]:

(1)

Тут - прикладена напруга зміщення (в прямому напрямку), - заряд електрона, - теплова енергія, - теплова напруга (25,69 мВ при 25 ° C). - густина струму, що протікає в умовах короткого замикання при освітленні. Ця густина представляє собою фотострум, який (принаймні для сонячних кремнієвих елементів) не залежить від зміщення , тоді як перший член в рівнянні (1) являє собою залежну від напруги густину струму в умовах темряви. Для темної характеристики . Відповідно до рівняння (1) світлова характеристика дорівнює темній характеристиці, яка зміщена в сторону від’ємного струму фотострумом , який є зворотнім струмом. Це явище відоме як "принцип суперпозиції". Рівняння (1) справедливе як для прямої, так і для зворотної полярності діода, причому останнє відповідає негативним значенням V.

Отже, при зворотному зміщенні в декілька в темряві (= 0), густина струму дорівнює, незалежно від величини зміщення *V* . Тому називається "густиною струму насичення". З рівняння (1) , для (стан відкритого контуру, фотострум повністю врівноважений темним струмом), можна отримати відомий вираз для напруги холостого ходу:

.

Цей вираз показує вплив темних характеристик на ККД параметрів: чим менше значення сонячного елемента, тим менша густина темного струму сонячної батареї, і тим вище значення напруги у розімкненому колі, а отже, і його ефективність. Ось чому детальне розуміння темної характеристики сонячної батареї є важливим для досягнення високої ефективності.

1.3 Дво-одіодна модель

Рівняння (1) - лише ідеалізований опис сонячного елемента. В реальності, треба ще врахувати послідовний опір (заданий в одиницях , якщо мова йде про густину струму) та щонайменше ще дві компоненти темного струму: рекомбінаційний струм [26] (другий діод) області виснаження та омічний струм шунта, викликаний паралельним опором , який часто називають опором шунта ( також заданий в одиницях , якщо мова йде про густину струму).

Це призводить до так званої дво-діодної моделі, де перший діод являє собою «ідеальний» діод рівняння (1), що описує так званий дифузійний струм, що характеризується густиною струму насичення , а другий діод - описує так звану рекомбінацію, що характеризується густиною струму насичення та фактором ідеальності .

Загалом, згідно з дво-діодною моделлю, густина струму сонячного елемента описується наступним чином [27]:

(2)

Величина - це "локальна напруга" безпосередньо на p-n переході, яка рівна різниці прикладеної напруги та падінні напруги на послідовному опорі . Шість параметрів у рівнянні (2), які регулюють властивості сонячного елемента, - це дві густини струму насичення та , коефіцієнт ідеальності струму рекомбінації, послідовний опір , паралельний опір і густина струму короткого замикання .

Зауважимо, що густина струму в рівнянні (2) задається лише неявно, що ускладнює всі обчислення. Отже, у обмеженому діапазоні зміщення (зазвичай між точкою максимальної потужності та ), рівняння (2) часто спрощується до емпіричного рівняння «однорідного» сонячного елементу, що містить ефективні значення для та коефіцієнта ідеальності

(3)

В цьому рівнянні вплив омічних та рекомбінаційних (другий діод) струмових внесків міститься в і . Цей ефективний коефіцієнт ідеальності відноситься до всього струму, а не тільки до рекомбінаційного струму. Якщо для кожного зміщення V в рівнянні (3) підібрана реальна характеристика елементу, то це призводить до залежного від зміщення коефіцієнту ідеальності , що дуже корисно для аналізу механізму провідності кремнієвих сонячних елементів.

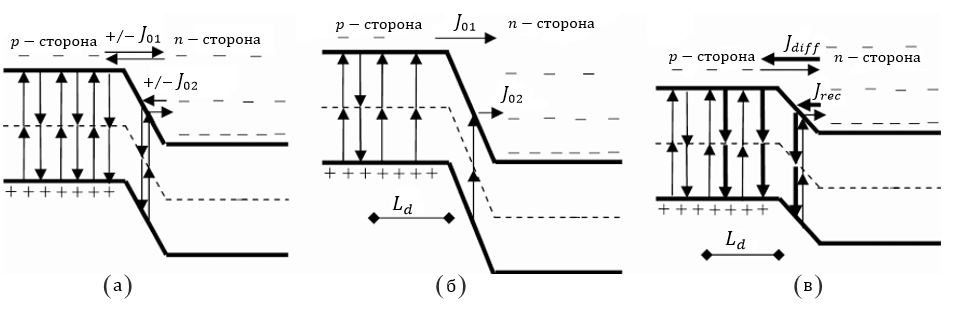


Рис. 2. Схематична діапазонна діаграма p-n переходу (а) - в тепловій рівновазі, (б) - при зворотному зміщенні та (в) - при прямому зміщенні (показані лише струми електронів) . Пунктирна лінія являє собою глибокий рекомбінаційний центр SRH, який керує надлишковим часом життя носія в p-області.

На Рис. 2 схематично показана зонна структура p-n переходу (a) в тепловій рівновазі, (б) при зворотному і (в) під прямому зміщенні. Фізику p-n переходу можна зрозуміти, тільки розглядаючи горизонтальні і вертикальні термічно індуковані процеси, які на Рис. 2 позначені стрілками. Для ясності вказані тільки електронні процеси, такі ж процеси також відбуваються і для дірок, де енергетичне масштабування інвертовано.

Навіть в термічній рівновазі існує теплова генерація (стрілки вгору) і рекомбінація (стрілки вниз), а також горизонтальний рух носія. Зауважимо, що вільні носії існують не тільки поблизу країв зони, як це часто відображається в таких схемах, але і глибоко в зоні. Вони підкорюються статистиці Фермі-Дірака, яка, якщо рівень Фермі лежить в межах забороненої зони, відповідає статистиці Максвелла – Больцмана. Ці електрони в глибині зони характеризуються великою кінетичною енергією. Тому їх можна назвати «гарячими» електронами, хоча вони перебувають у тепловій рівновазі з усіма іншими електронами та з граткою. Зі збільшенням енергетичної відстані до країв зони, концентрація вільних носіїв зменшується пропорційно до Так як енергія Фермі проходить горизонтально через Рис. 2 (а) (там не показано), концентрація електронів в р-зоні (зліва) по суті дорівнює концентрації електронів в n−зоні (праворуч), що мають енергію вище положення краю зони провідності в р−зоні. Тільки ці "гарячі " електрони мають достатню кінетичну енергію, щоб подолати гальмівне електричне поле в області збіднення і увійти в р-зону.

Двома рушійними силами для горизонтального переміщення носія є градієнт концентрації, що приводить до так званого дифузійного струму, і електричне поле, що приводить до польового струму. Розгляд цих двох внесків незалежно один від одного, причому тільки сума обох є вимірюваним чистим струмом, називається принципом детального балансу. У термічній рівновазі по всій області збідненя ці дві горизонтальні течії врівноважують одна одну[27].

1.4 Фактор ідеальності

Для напівпровідникових пристроїв важливо знайти коефіцієнт ідеальності діода, оскільки цей коефіцієнт є важливим параметром при описі електричної поведінки пристрою. Коефіцієнт ідеальності вводиться як параметр для моделювання таким чином, що крива дає підбор характеристики струму-напруги.

Значення коефіцієнта ідеальності вказує на те, що механізм рекомбінації носіїв в сонячному елементі включає пастки. Якщо рекомбінація, яка пов’язана з дефектом, є домінуючою, то значення, яке часто пишуть в публікаціях для коефіцієнта ідеальності, дорівнює . Це значення коефіцієнта ідеальності передбачає досить специфічні припущення про енергетичні рівні (середина забороненої зони) і переріз захоплення рекомбінаційних центрів (однакові для дірок і електронів) в симетрично легованому діоді [28,29].

Як правило, для реальних пристроїв, значення коефіцієнта ідеальності, як вже було сказано, коливається від 1 до 2 і залежить від умов навколишнього середовища та параметрів рекомбінаційного струму, в тому числі від концентрації пасток [29-33]. Це робить фактор ідеальності важливим параметром, який може бути використаний для опису електричної поведінки фотоелектричних модулів і характеристики рекомбінації в кремнієвих сонячних елементів [34].

Коефіцієнт ідеальності діода, який розрахований за темними характеристиками, значно більше одиниці і має сильну залежність від температури. Аналіз температурних тенденцій коефіцієнта ідеальності діода в нових кремнієвих сонячних елементах показав, що транспортний механізм складається як з тунелювання за допомогою пасток, так і з термоелектронної емісії [35].

25. Shockley W. The theory of p-n junction in semiconductors and p-n junction transistors // Bell Syst. Tec. J. – 1949. – Jul. – Vol. 28. – Pp. 435-489.

26. <http://pveducation.org/pvcdrom>

27. Physics of Semiconductor devices / Simon M. Sze., Kwok K. Ng. // Wiley-Interscience. – 2006. – Oct. – 27.

28. Effects of pn-junctions bordering on surfaces investigated by means of 2D-modeling / R. Kuhn, P. Fath, E. Bucher // Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No.00CH37036) – 2000. – Pp. 116-119. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2000.915768>

29. Humps in dark I-V-curves-analysis and explanation / J. Beier, B. Voss // Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1993 (Cat. No.93CH3283-9) – 1993. – Pp. 321-326. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.1993.347163>

30. Depletion-region recombination in silicon solar cells. When does mdr = 2? / K. McIntosh, P. Altermatt, G. Heiser // 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceedings of the International Conference and Exhibiton. – 2000. – Pp. 250-253.

31. Conduction processes in silicon solar cells / A. Kaminski, J. J. Marchand, H. El Omari, A. Laugier, Q. N. Le, D. Sarti // Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1996. – 1996. – Pp. 573-576. – <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.1996.564071>

32. Evaluation of recombination processes using the local ideality factor of carrier lifetime measurements / Z. Hameiri, K. McIntosh, G. Xu // Sol. Energy Mater Sol. Cells. – 2013. – Pp. 251-258. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.040>

33. Explanation of high solar cell diode factors by nonuniform contact resistance / A. S. H. van der Heide, A. Schonecker, J. H. Bultman, W. C. Sinke // Res. Appl. 13. – 2005. – Pp. 3-16. – <http://dx.doi.org/10.1002/pip.556>

34. Relationship between the diode ideality factor and the Carrier recombination resistance in organic solar cells / I. Duan, H. Yi, C. Xu, M. B. Mahmud, D. Wang, F. H. Shabab, A. Uddin // IEEE J. Photovolt 8. – 2018. – Pp. 1701-1709. – <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870722>.

35. Electrical characterization of novel Si Solar Cells / O. Tuzun, S. Oktik, S. Altindal, T. S. Mammadov // Th. Sol. Film. – 2006. – Jan. – 25. – Pp. – 258-264.

2. Симулятор сонячних елементів SCAPS

2.1 Основні відомості та характеристики

SCAPS – це одномірна програма для моделювання сонячних елементів, яка була розроблена на кафедрі Електроніки та Інформаційних систем університету Гента, Бельгія. Перш за все, SCAPS був розроблений для сімейства структур CuInSe2 і CdTe. Однак, кілька розширень програми поліпшили можливості, так що програму можна застосовувати для кристалічних сонячних елементів (сімейство Si і GaAs) і аморфних елементів (a-Si і мікроморфний Si). Основні характеристики програми нижче[36]:

- до 7 напівпровідникових шарів

- майже всі параметри можуть бути градуйовані: всі пастки (дефекти)

- механізми рекомбінації: з зони в зону (прямий), Оже-рекомбінація, SRH

- рівні дефектів: в об’ємі або на межі розділу; враховується їх заряд і рекомбінація

- рівні дефектів, тип заряду: без заряду (ідеалізація), одновалентний (один донор, акцептор), двовалентний ( подвійний донор, подвійний акцептор, амфотерний), багатовалентний (визначається користувачем)

- рівні дефектів, енергетичний розподіл: один рівень, рівномірний, Гаус, хвіст, або комбінації

- рівні дефектів, оптичні властивості: пряме збудження за допомогою світла (домішковий фотовольтаїчний ефект)

- рівні дефектів, метастабільні переходи між дефектами

- контакти: робоча функція або плоский діапазон; оптична властивість (відбиття фільтру пропускання) фільтру

- тунелювання: тунелювання всередині зони (в межах зони індукції або в межах валентної зони); тунелювання в поверхневі стани і з них

- генерація: або з внутрішнього розрахунку, або встановлюється користувачем файлом g(x)

- освітлення: різні стандартні та інші включенні в програму спектри (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5Gedition2, монохроматичний, білий та інші)

- освітлення: з p-сторони або з n-сторони; вимкнення або затухання спектру

- робочі точки для розрахунків: напруга, частота, температура

- програма обчислює енергетичні діапазони, концентрації та струм в робочій точці, J-V характеристики, характеристики змінного струму, спектральну чутливість (також зі зміщенням світла або напруги)

- можливі пакетні розрахунки; представлення результатів і налаштувань в залежності від параметрів пакету

- завантаження та збереження всіх налаштувань; запуск SCAPS в персоналізованій конфігурації; скриптова мова, що включає вільну функцію для користування

- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс

- всі внутрішні змінні можуть бути доступні і побудовані за допомогою скриптів

- вбудований засіб підбору кривої

2.2 Визначення сонячного елементу

2.2.1 Редагування структури сонячного елементу

Рекомендований спосіб введення структури сонячних елементів у SCAPS - це використання графічного інтерфейсу. Таким чином, ви можете інтерактивно задавати всі параметри, поки SCAPS спостерігає за вами, щоб ви не вводили неможливі або нереальні ситуації.

Функція роботи з металом (для більшості носіїв) може бути введена користувачем. Однак ви також можете вибрати опцію ‘flat bands’. У цьому випадку SCAPS обчислює цю функцію для кожної температури таким чином, щоб переважала умова плоскої зони. Коли шар, що прилягає до контакту, є n-типу, то використовується рівняння (4), коли p-типу - використовується рівняння (5), коли шар можна вважати внутрішнім - використовується рівняння (6).

(4)

(5)

(6)

2.2.2 Температурна залежність параметрів сонячного елементу

Густина станів в зоні провідності та валентній зоні залежить від температури відповідно до рівняння (7). це температура за замовчуванням (рівна 300 К). Теплова швидкість залежить від температури відповідно до рівняння (8). Передбачається, що всі інші параметри не залежать від температури. Коефіцієнт дифузії , який використовується в розрахунках, залежить від температури.

(7)

(8)

2.2.3 Градуювання: загальний підхід

Всі параметри шару можуть бути градуйовані. Щоб дати відповідний і орієнтований на матеріали опис градуювання різних параметрів, SCAPS послідовно виводить всі параметри з градуювання складу шару. Передбачається, що кожен шар має склад Користувач визначає властивості чистих сполук A (наприклад A=CuInSe2) і B (наприклад CuInS2), а також склад градуювання y(x) по товщині шару: таким чином визначаючи значення складу y на лівій і правій стороні шару і вказуючи деякий діапазон градуювання між ними. Всі властивості матеріалів P потім виводяться з локального параметру складу y(x), тобто оцінюється P[y(x)]. Багато законів градуювання реалізовані в SCAPS і пропонуються інтерфейсом: рівномірний, лінійний, логарифмічний, параболічний (два закони), степеневий, експоненціальний, ефективний середній, з файлу і бета-функція.

Таблиця 1. Основні градуювальні закони.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Назва закону |  | Зауваження |
| Рівномірний |  | - |
| Лінійний |  | - |
| Параболічний 1 |  | b – фактор прогинання  (bowing factor) |
| Параболічний 2 |  | Є дві параболи, по одній з кожної сторони точки [], які можуть бути задані в інтерфейсі. Для екстраполяції використовується рівняння четвертого порядку |
| Логарифмічний |  | - |
| Експоненціальний |  | фонове значення  характерні довжини |
| Бета функція |  | неповна бета функція |
| Степеневий |  | m – степінь |
| Ефективний середній | ( | Не доступний для композиції. Це рівняння Бруггемана. |

36. SCAPS manual / A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verschraegen, S. Degrave // 2013. – Sep. – 2. - https://users.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/projects/scaps/SCAPS%20Manual%202%20september%202013.pdf