

В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков, С.І.
Круковський, М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь

Нові матеріали та пристрої для сонячної енергетики

Монографія



Хмельницький
2019

**В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков,
С.І. Круковський, М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь**

Нові матеріали та пристрої для сонячної енергетики

Монографія

**Хмельницький
2019**

Рекомендовано до друку Вченою радою Хмельницького національного університету, протокол № 4 від 28 листопада 2019 р.

Рецензенти:

Кулаков П.І. – д.т.н., професор кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького національного технічного університету;

Лисий М.І. – д.т.н., доцент, професор кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону Національної академії Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького.

В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков, С.І. Круковський
М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь

Нові матеріали та пристрої для сонячної енергетики: Монографія / В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков, С.І. Круковський, М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь – Хмельницький: ХНУ, 2019. – 144 с.

Розглянуто нові матеріали та пристрої для сонячної енергетики. Наведено результати експериментальних та теоретичних досліджень характеристик сучасних фотоелектричних модулів, імпульсних перетворювачів, накопичувачів енергії та пристроїв відстежування положення сонця.

Рекомендується для науковців та фахівців, які займаються розробкою та обслуговуванням джерел електроживлення на основі сонячних фотоелектричних модулів.

ISBN 978-966-8776-44-1

В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков, С.І. Круковський
М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь 2019
ХНУ, оригінал–макет, 2019

Наукове видання

В.В. Мартинюк, Г.А. Ільчук, В.Д. Косенков, С.І. Круковський
М.В. Федула, Р.Ю. Петрусь

**Нові матеріали та пристрої для сонячної
енергетики**

Монографія

Редактор – коректор: Мартинюк О.В.

Підписано до друку 28.11.2019
Формат 30×42/4. Папір офс. Гарн. Times New Roman
Ум. друк. арк. 10,73. Обл. – вид. арк. 9,41
Тираж 300 прим.

Віддруковано з готового оригінал-макета ФОП Ковальський В.В.,
м.Хмельницький, вул.Свободи, 53, т.(0382) 76-42-92
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ХЦ №021 від 12.07.2002р.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

СК	– суперконденсатор;
СКБ	– суперконденсаторна батарея;
ОЕС	– об'єднана енергосистема України;
СМ	– сонячний модуль;
СЕ	– сонячний елемент;
ОПЗ	– область просторового заряду;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
ВАХ	– вольт-амперна характеристика;
АМ	– атмосферна маса;
ТМП	– точка максимальної потужності;
ПЕШ	– подвійний електричний шар;
АПК	– асиметричні псевдоконденсатори;
ГК	– гібридні конденсатори;
СКПЕШ	– симетричні конденсатори з подвійним електричним шаром;
НТРФЕ	– низькотемпературна рідиннофазна епітаксія
РЗЕ	– рідкісноземельні елементи;
РФЕ	– рідиннофазна епітаксія;
ФЕП	– фотоелектричний перетворювач;
ФМ	– фотоелектричний модуль

ВСТУП

Сонячна енергетика – є одним з перспективних напрямів використання енергії відновлюваних джерел, що швидко розвивається в Україні і в світі загалом. Використання сонячної енергетики сприяє розв'язанню не тільки питань ефективного енергозабезпечення, але й багатьох екологічних, економічних і соціальних проблем.

Незважаючи на невеликий ККД промислових фотоелектричних модулів, який як правило, складає близько 15%, сонячна енергетика має значні перспективи свого розвитку і поширення на світовому ринку. Тому на сучасному етапі розвитку сонячної енергетики на перше місце виходять проблеми розроблення високоефективних сонячних елементів з використанням нового класу матеріалів – варізонних напівпровідникових плівок та наноматеріалів, а також задачі ефективного використання та відбору енергії від сонячних елементів (СЕ) за рахунок застосування передових технологій. Можливість прямого перетворення енергії сонячної радіації в електричну енергію є основною перевагою сонячної енергетики над іншими видами відновлювальних джерел енергії. Однак величина енергії сонячної радіації значною мірою залежить від астрономічних і метеорологічних факторів – висоти Сонця над горизонтом, тривалості дня, хмарності, вологості та прозорості атмосфери. Тому для досягнення максимальної ефективності сонячних систем актуальним є розроблення і застосування пристроїв відслідковування точки максимальної потужності, а також пристроїв відслідковування положення Сонця.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ ВІД ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

1.1. Втрати енергії у сонячних фотоелектричних системах

Основні втрати енергії фотоелектричних модулів (ФМ) пов'язані з неоптимальним режимом їх роботи, зокрема для стаціонарно зафіксованих ФМ кут падіння сонячних променів більшості часу не дорівнює 90° [1], а існуючі методи відслідковування ТМП на рівні стрінгу не вирішують проблеми оптимальної роботи кожного окремого ФМ. Для забезпечення відбору максимальної потужності від ФМ, враховуючи їхню вольт-амперну характеристику (ВАХ) і залежність потужності від напруги, використовують спеціальні засоби для відслідковування ТМП. Існує декілька основних методів пошуку ТМП [2], які відрізняються складністю, швидкістю, ефективністю, вартістю тощо і кожен з них має свої недоліки. ФМ мають складний взаємозв'язок між умовами навколишнього середовища і максимальної виробленої потужністю.

Одним з найбільш поширених є метод впливу і спостережень (Perturbation & Observation, P&O) [3], що полягає у періодичній зміні з певним кроком вихідної напруги і вимірювані потужності. Якщо потужність збільшується - контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку поки потужність не перестане збільшуватися. Цей метод ефективно працює тільки у повільно змінних метеорологічних умовах і має достатньо тривалий пошук оптимуму; Подальшим розвитком P&O став метод на основі порівняння трьох точок потужності (Three Point Weight Comparison) [4]. Його перевагами над методом P&O є менші коливання вихідної потужності. У сучасних приладах широко застосовуються наближені методи пошуку ТМП метод напруги холостого ходу (Fractional Open-Circuit Voltage) [5] і метод струму короткого замикання (Fractional Short-Circuit Current) [6], у яких відбувається регулярне відімкнення навантаження для вимірювання напруги холостого ходу чи струму короткого замикання, що спричиняє втрати потужності під час вимірювання і втрати, пов'язані з неточним визначенням ТМП. Існує багато методів, які базуються на використанні похідних струму, напруги і потужності. Зокрема метод контролю кореляції пульсацій (Ripple Correlation Control – RCC) [6], та інкрементальної провідності (Incremental Conductance) [7] характеризуються високою швидкістю та застосовуються для керування широтно-імпульсним перетворювачем.

Однак у всіх цих методах з дискретною системою пошуку виникають осциляції робочої точки навколо точки максимуму i , відповідно, коливання потужності.

Проблема максимального відбору енергії фотоелектричного модуля пов'язана з дослідженням його нелінійності, яка визначає робочі точки на вольт-амперних характеристиках при різних значеннях освітленості і температури. Нелінійність еквівалентного джерела струму суттєво впливає на втрати енергії в зовнішніх колах, і тому повинна враховуватися в процесі розробки імпульсних перетворювачів, які керують робочими точками фотоелектричних модулів.

Імпульсні перетворювачі широко використовуються в сучасній електроніці та енергетиці для реалізації джерел електроживлення [8], керування режимами роботи електричних кіл із підтримкою необхідної форми струму і напруги [9], та для мінімізації втрат енергії [10], зокрема при низьких напругах джерела.

Особливо актуальним на даний час є застосування імпульсних перетворювачів в енергетиці на базі відновлюваних джерел енергії [11]. Наприклад у сонячній енергетиці імпульсні схеми використовуються для реалізації оптимізаторів сонячних модулів [12].

Аналіз методів керування імпульсними перетворювачами приведено в [13]. Для ефективної реалізації розглянутих методів керування необхідним є розвиток моделей і алгоритмів, які дозволяють визначати параметри і режими роботи підвищуючих імпульсних перетворювачів (boost-конвертерів) з мінімальними втратами енергії [14].

Відомі пристрої та схеми керування boost-конвертерами базуються на програмній [15] та апаратній [16] реалізації методів керування.

Методи розрахунку схем boost-конвертерів приведено в [17]. Методи аналізу схем імпульсних перетворювачів шляхом розв'язання диференційних рівнянь приведено в [18]. Сучасні методи моделювання boost-конвертерів описуються в [19]. Аналіз нестабільних режимів роботи boost-конвертерів приведено в [20]. Приклади більш складних boost-конвертерів приведені в літературі [21].

Підвищення ефективності відбору енергії від джерела постійного струму потрібно в багатьох областях сучасної електротехніки, зокрема, у сонячній [22] та вітровій [23] енергетиці, в

пристроях малої потужності [24] та різних джерелах живлення [25]. У випадках жорстких вимог до втрат енергії, електричні схеми і системи повинні бути розроблені з урахуванням багатьох паразитних параметрів і точних характеристик режиму роботи [26], які суттєво впливають на втрати енергії. У роботі [26] описується вплив паразитних елементів на режими і перехідні характеристики перетворювачів DC-DC. Показано, що невеликі зміни в еквівалентній схемі імпульсного пристрою можуть викликати значні зміни втрат енергії.

На даний час відновлювані джерела енергії є одним з найбільш важливих питань сучасної енергетики [27]. У роботі [27] показано, що відстеження точки максимальної потужності дозволяє істотно збільшити відбір енергії від джерела. Таким чином, розвиток відновлюваної енергетики має суттєвий вплив на сучасні дослідження та розробку нових перетворювачів енергії [28], які, відповідно, повинні бути достатньо "гнучкими" у керуванні [29] для інтеграції в "розумні електромережі" SmartGrid [30]. Таким чином, схеми імпульсних перетворювачів повинні забезпечувати можливість контролю збільшення і зменшення вихідного струму та напруги відносно вхідних значень.

Такі вимоги приводять до застосування інвертуючих імпульсних перетворювачів (buck-boost converter), що здатні забезпечувати як підвищення, так і зниження напруги [31]. У статті [32] описуються режими та основні проблеми моделювання схеми інвертуючого імпульсного перетворювача.

З метою проектування пристроїв сонячної енергетики часто використовується числове математичне моделювання [33], з урахуванням точних значень пульсацій. Але огинаючі криві перехідних процесів в імпульсних колах можуть бути отримані за допомогою більш простих аналітичних методів на основі усереднення у просторі станів [34].

1.2. Аналіз засобів зниження втрат енергії фотоелектричних модулів

В процесі відбору енергії від фотоелектричного модуля основними причинами втрат є послідовний та паралельний паразитний еквівалентний опір ФМ, паразитні опори кіл перетворювачів, а також недостатня узгодженість навантаження з ФМ.

Розглянемо роботу джерела [28] з постійним внутрішнім опором R_0 . Відомо, що для прямого підключення джерела до навантаження режимом точки максимальної потужності (рис. 1.1.) є узгоджений режим [35,36] :

$$R_{ld} = R_0; \quad U_{ld0} = \frac{E}{2}; \quad P_{ld0} = \frac{E^2}{4R_0}, \quad (0.1)$$

де E - електрорушійна сила, R_{ld} - опір навантаження, U_{ld0} , P_{ld0} - напруга і потужність на навантаженні при прямому підключенні до джерела, відповідно.

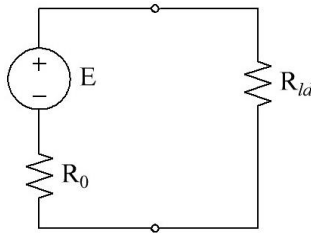


Рис. 1.1. Пряме підключення джерела до навантаження.

При довільному опорі навантаження $R_{ld} = kR_0$, напруга навантаження U_{ldk} та потужність навантаження P_{ldk} визначаються виразом:

$$U_{ldk} = E \frac{k}{1+k}; \quad P_{ldk} = \frac{U_{ld}^2}{kR_0}, \quad (0.2)$$

де $k = R_{ld} / R_0$.

Для отримання максимальної потужності P_{ld0} на довільному навантаженні R_{ld} , має виконуватися рівність (0.3):

$$P_{ld0} = P_{ldk} \quad (0.3)$$

Таким чином, для виконання умови узгодження еквівалентного навантаження (0.1), відповідна напруга довільного навантаження U_{ldk} має визначатися як (0.4):

$$U_{ldk} = \frac{E}{2} \sqrt{k}. \quad (0.4)$$

Тоді співвідношення між напругою узгодженого навантаження (0.4) і напругою прямого підключення навантаження (0.2) визначається виразом:

$$\frac{\frac{E}{2}\sqrt{k}}{E\frac{k}{1+k}} = \frac{1+k}{2\sqrt{k}} \quad (0.5)$$

Отже, при $0 < k < 1$ необхідна напруга навантаження (0.4) завжди вища ніж при прямому підключенні U_{ldk} [36].

1.3. Імпульсні перетворювачі

Імпульсними перетворювачами енергії є електричні кола, до складу яких входять електронні ключі, які дозволяють отримувати режими коливальних напруги та струму, недоступні у лінійних електричних колах, без значних втрат енергії.

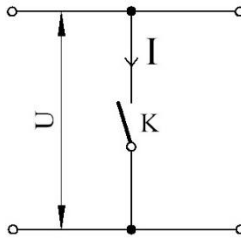


Рис. 1.2. Ключ в електричному колі.

Ключ в електричному колі протягом тривалого часу може перебувати в одному із двох можливих станів:

- розімкнутий (дуже великий опір $R \rightarrow \infty$);
- замкнений (дуже малий опір $R \rightarrow 0$).

Як видно з рис. 1.3, в обох випадках втрати енергії на ключі є незначними, оскільки коли ключ розімкнений, то на ньому величина сили струму близька до нуля, а коли замкнений, то, відповідно, спад напруги є близьким до нуля. Таким чином, потужність в обох випадках прямує до нуля.

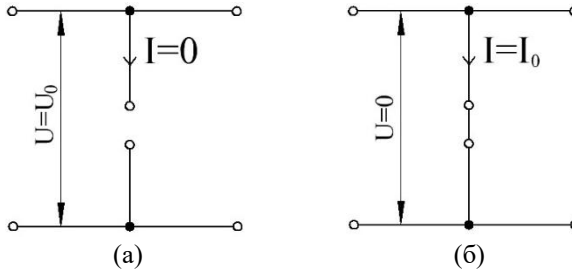


Рис. 1.3. Еквівалентні схеми ключа: (а) розімкнутий ключ; (б) замкнутий ключ.

Основні втрати енергії на електронних ключах відбуваються під час переходів з одного стану в інший, в процесі яких струм та напруга не є рівними нулю одночасно.

Математична модель, яка описує вплив ключа на електричне коло при перемиканні з постійною частотою, може бути описана виразом:

$$\begin{cases} U = D \cdot U_0, \\ I = (1 - D) \cdot I_0, \end{cases} \quad (0.6)$$

де U_0 – напруга розімкнутого ключа, I_0 – струм замкнутого ключа, D – коефіцієнт заповнення імпульсів керування ключем.

Як бачимо із виразу (0.6), ключ в електричному колі дозволяє реалізувати еквівалентні характеристики, які неможливо отримати, використовуючи тільки RLC-елементи. При цьому, втрати енергії на ключі визначаються часом його перемикання.

Таким чином, імпульсні комутаційні кола є необхідними для реалізації перетворювачів форми напруги та струму в електричних колах великої потужності на основі сучасної елементної бази.

1.3.1. Імпульсні перетворювачі з пониженням напруги

Розглянемо деякі прості способи отримання напруги навантаження, вищої, ніж напруга при прямому підключенні навантаження до джерела. Відповідно до [29,36] імпульсний режим роботи проаналізовано для підключення джерела постійної напруги і конденсатора.

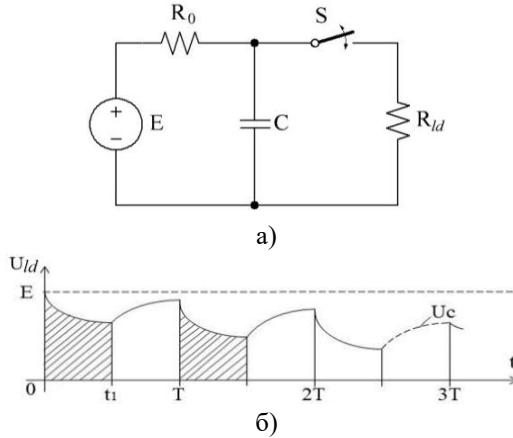


Рис. 1.4. Імпульсний режим роботи джерела.

Тут, напруга прикладається до навантаження протягом часу t_1 . Відповідно до [28], Після завершення перехідного процесу обвідної, коли напруга навантаження періодично змінюється з комутацією ключа, при $R_{ld} = R_0$, виконується рівність (0.7):

$$U_{ld} = U_C = \frac{E}{2} + Q \frac{E}{2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (0.7)$$

де t – час; τ – постійна часу перехідного процесу, $\tau = \frac{R_0 C}{2}$. Константа

$Q \approx 0.5$ отримана при різних значеннях періоду комутації T ($T = \frac{\tau}{5}$,

$T = \frac{\tau}{10}$, $T = \frac{\tau}{25}$), а також $t_1 = \frac{T}{2}$, з розв'язків диференційного рівняння схеми (рис. 1.4) для замкнутого і розімкнутого ключа [37].

Потім, у колі без конденсатора, енергія за один період визначається виразом (0.8):

$$W = 0.25 \frac{E^2 T}{R_{ld}} \quad (0.8)$$

а в колі з конденсатором, відповідно:

$$W = 0.278 \frac{E^2 T}{R_{ld}} \quad (0.9)$$

Отже, збільшення енергії становить близько 11%. Показано, що при $R_{ld} = 0.5R_0$, буде отримано збільшення енергії 22%. Таким чином, імпульсний режим роботи джерела постійної напруги з конденсатором є більш ефективним при $R_{ld} \leq R_0$. Проте, коли $R_{ld} > R_0$, «Пауза» в напрузі навантаження призводить до зменшення енергії у порівнянні із схемою на рис. 1.1. Проаналізована схема (рис. 1.4) показує, що перехідні процеси при перемиканні дозволяють отримати підвищену середню напругу $U_{ldAV} > U_{ld0}$ для $R_{ld} \leq R_0$. Таке збільшення потужності, що передається від джерела до навантаження, отримано завдяки конденсатору, який діє як джерело напруги в перехідних процесах.

Подальше вдосконалення схеми з конденсатором обговорюється в [38]. Вказаний підхід також використовується в різних колах понижуючих перетворювачів [39]. Результати представлені у [40], показують, що можна отримати більш високе середнє значення напруги на навантаженні U_{ld} протягом періоду T , і наблизити його до $U_{ldAV} \approx E$, але без подальшого збільшення. Тому, зазначені вище схеми імпульсних перетворювачів можуть бути ефективно використані при малих значеннях опору навантаження [40].

Вдосконалення схеми з конденсатором представлено в роботі [41]. На рис. 1.5 показана схема кола. Рис. 1.6 і рис. 1.7 ілюструють графіки заряду і розряду конденсатора, а також відповідний графік напруги навантаження.

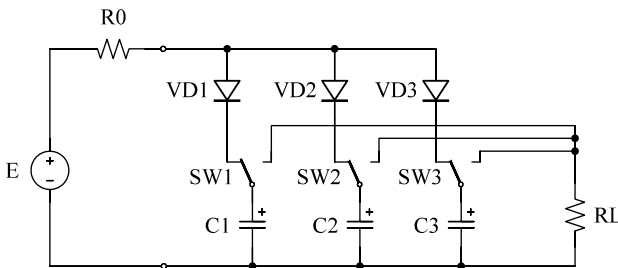


Рис. 1.5. Електрична схема для збільшення енергії на опорі навантаження в електричному колі з постійної електрорушійної силою.

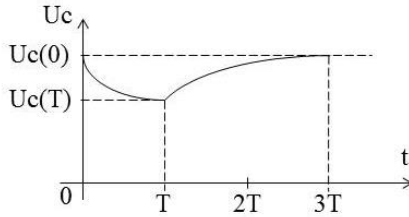


Рис. 1.6. Розрядні та зарядні криві одного конденсатора.

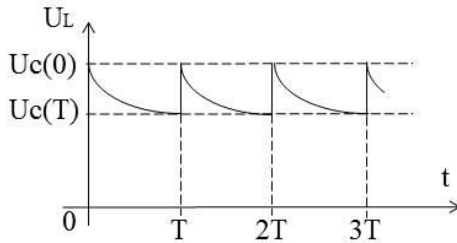


Рис. 1.7. Крива напруги на опорі навантаження в кожен період.

Особливість схеми полягає в тому, що конденсатори підключаються до опору навантаження, в черзі протягом періоду T . Після відключення від навантаження, конденсатор заряджається до напруги $U_C(0) = K_1 E$, в той час як інші конденсатори розряджаються на навантаження. Якщо встановити напругу наприкінці процесу розряду $U_C(0) = K_2 E$, то необхідний період комутації визначається виразом:

$$T = R_0 C \ln \frac{K_1}{K_2} \quad (0.10)$$

Було доведено, що відношення енергії W_2 в колі з конденсаторами (рис. 1.5) до енергії W_1 в схемі з прямим підключенням навантаження до джерела для заданого періоду часу може бути визначено за формулою:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{K_1^2 - K_2^2}{2K_3^2 \ln(K_1 / K_2)}, \quad (0.11)$$

де

$$K_3 = \frac{R_L}{R_0 + R_L}. \quad (0.12)$$

Для $K_1 = 0.95$, і $K_2 = K_3$, результати розрахунків при різних значеннях R_L наведені в таблиці 1.1.

Таким чином, схема має деякі переваги в порівнянні зі схемою на рис. 1.1, якщо $R_L > R_0$, проте вона вимагає більше конденсаторів і перемикачів.

Таблиця 1.1

R_{ld}	W_2 / W_1
$0.5R_0$	3.39
R_0	2.03
$2R_0$	1.45
$3R_0$	1.28

Гіпотетично, за рахунок збільшення K_1 і числа конденсаторів, а також зміни K_2 , можна отримати більш високе середнє значення напруги U_L протягом періоду T і наблизити його до $U_{Lav} \approx E$.

1.3.2. Імпульсні перетворювачі з підвищенням напруги

Схема на рис. 1.8 дозволяє отримати $U_{Lav} > E$ [28,35,38,42]

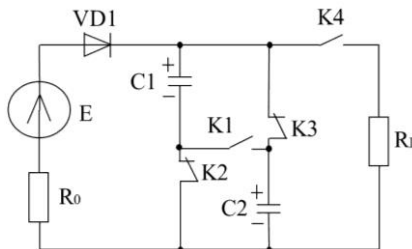


Рис. 1.8. Схема зі збільшенням напруги навантаження

У початковому стані конденсатори C_1 і C_2 заряджаються до напруги $U_{C1}(0) = U_{C2}(0) = E$. В той час як розмикаються ключі K_2 і K_3 та замикаються ключі K_1 і K_4 , до навантаження прикладається напруга $U_{C1} + U_{C2} = 2E$. За час $t_1 < T$ конденсатори розряджаються, ключі K_1 і K_4 розмикаються, а ключі K_2 і K_3 замикаються, та заряджаються конденсатори C_1, C_2 . Таким чином, ми прийшли до аналізу роботи схеми на рис. 1.4, але з більш високою напругою U_L ,

Схема, показана на рис. 1.9 дозволяє збільшити напругу навантаження на $U_{Lav} > E$,

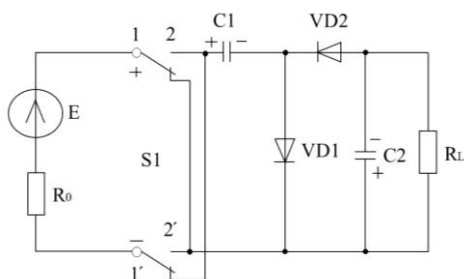


Рис. 1.9. Схема з перемиканням полярності джерела

Насправді, на рис. 1.9 зображена схема для випрямлення змінної напруги з множенням. Змінна напруга на полюсах 2-2' забезпечується шляхом періодичного підключення джерела живлення до кола з різними полюсами. Рекомендований період перемикання $T \approx (4...5)RC_1$, де R - опір з'єднання джерела і конденсатора. Тоді, при $R_L C_2 \gg RC_1$ схема забезпечує практичне подвоєння напруги.

Аналогічний підхід може бути використаний для отримання середньої напруги навантаження, вищої, ніж напруга джерела вхідного сигналу. На рис. 1.5, схема дозволяє отримати $U_{idAV} > E$, відповідно до [28,35].

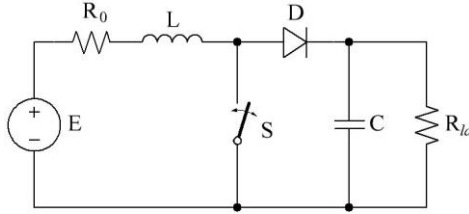


Рис. 1.10. Підвищуючий імпульсний перетворювач (boost-конвертер)

Струм котушки індуктивності $i_L(t)$ визначається за допомогою виразу (0.13):

$$i_L(t) = \frac{1}{L_0} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \quad (0.13)$$

Якщо ключ S замкнутий, то напруга котушки індуктивності $u_L(t)$ є додатною, і струм $i_L(t)$ збільшується. У випадку розмикання ключа котушка індуктивності заряджає конденсатор C, діючи як джерело струму, відповідно до (0.13), і напруга конденсатора $u_C(t)$ визначається формулою:

$$u_C(t) = \frac{1}{C_0} \int_0^t i_C(\tau) d\tau \approx \frac{1-D}{C} \int_0^t i_L(\tau) d\tau - \frac{1}{R_{ld}C_0} \int_0^t u_C(\tau) d\tau, \quad (0.14)$$

де D - коефіцієнт заповнення імпульсів комутації.

Таким чином, якщо виконується нерівність (0.15), то збільшення напруги на конденсаторі відбувається протягом інтервалу часу $t \in [T_1; T_2]$:

$$\frac{1-D}{C} \int_{T_1}^{T_2} i_L(\tau) d\tau > \frac{1}{R_{ld}C} \int_{T_1}^{T_2} u_C(\tau) d\tau, \quad (0.15)$$

оскільки

$$u_C(T_2) = u_C(T_1) + \frac{1-D}{C} \int_{T_1}^{T_2} i_L(\tau) d\tau - \frac{1}{R_{ld}C} \int_{T_1}^{T_2} u_C(\tau) d\tau,$$

Вирази (0.14) і (0.15) показують, що максимальне значення напруги навантаження не обмежується значенням електрорушійної сили E , оскільки котушка індуктивності L діє як джерело струму, яке заряджає конденсатор C [35].

Розробка комутаційних схем перетворювачів на основі описаного підходу показана в [25]. Схема підвищуючого перетворювача [43] дозволяє значно збільшувати напругу навантаження відносно напруги джерела ($U_{ld} > E$). Показано, що найбільш ефективно застосування схем підвищуючих перетворювачів може бути отримано при великих значеннях опору навантаження $R_{ld} \gg R_0$.

1.4. Особливості узгодження схем з нелінійними паразитними елементами

Розглянемо роботу схеми з джерелом постійної напруги, що містить нелінійний внутрішній опір (рис. 1.11)[26],

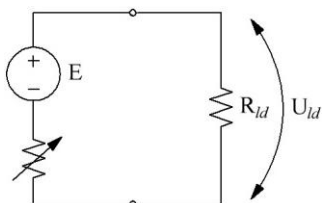


Рис. 1.11. Схема з джерелом, яке характеризується нелінійним внутрішнім опором.

Слід зазначити, що наявність нелінійних елементів може значно підвищити складність динаміки схеми перетворювача DC-DC. Зокрема, у таких випадках можуть виникати хаотичні режими коливаль обвідної напруги або струму перетворювача [20].

Потужність навантаження при наявності нелінійного елемента визначається формулою (0.16):

$$P_{ld} = U_{ld} I = (E - U_{NE}) I, \quad (0.16)$$

де I - струм, і U_{NE} - напруга нелінійного елемента. Відповідно до [44], потужність на навантаженні імпульсного перетворювача може бути описана диференціальним рівнянням:

$$\frac{dP_{ld}}{dI} = E - U_{NE} - I \frac{dU_{NE}}{dI} = 0$$

Таким чином, беручи до уваги, що $E - U_{NE} = IR_{ld}$, ми прийшли до виразу:

$$IR_{ld} - I \frac{dU_{NE}}{dI} = 0, \quad R_{ld} = R_{dif}. \quad (0.17)$$

Значення струму в колі визначається величиною статичного опору нелінійного елемента R_{st} та значенням опору навантаження R_{ld} , яке, в свою чергу повинно бути рівним диференційному опору R_{dif} , необхідного для отримання $P_{ld} = \max$ [35].

Проведений аналіз методів підвищення ефективності відбору енергії показує, що відстежування точки максимальної потужності джерела струму вимагає точного управління процесом перемикання еквівалентного опору перетворювача. При наявності нелінійних паразитних елементів, диференціальний опір може бути використано для характеристики робочої точки джерела і перетворювача.

Для описаних джерел, імпульсні перетворювачі повинні забезпечувати можливості як збільшення, так і зменшення вихідної напруги відносно вхідної з контролем еквівалентного диференційного опору.

2. ПЛІВКИ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ AlGaAs ЯК ОСНОВА СУЧАСНИХ ВАРІЗОННИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Відомо, що фотоелектричний перетворювач (ФЕП) на основі напівпровідникової структури з одним р-п переходом може перетворювати в електричну енергію тільки певний енергетичний діапазон сонячного спектру [45], енергія фотонів якого є рівною, або ж більшою від ширини забороненої зони активної області напівпровідникового матеріалу. Фотони з меншою енергією поглинаються активною областю напівпровідникової структури без фотогенерації носіїв заряду. Збільшення коефіцієнта корисної дії ФЕП можна досягнути, якщо розширити спектральний діапазон сонячного світла, що спричиняє фотогенерацію носіїв заряду в області р-п переходу.

Існує два підходи до розв'язання цієї задачі. Перший, і найбільш сьогодні застосовуваний базується на використанні тандемних (каскадних) фотоперетворювачів сонячного світла в котрих один над одним розміщуються два або більше р-п переходів із напівпровідникових матеріалів з різною шириною забороненої зони (E_g). Кожен каскад, в таких фотоперетворювачах, перетворює у фотострум тільки певну ділянку сонячного спектру, яка визначається шириною забороненої зони напівпровідника. Архітектура таких фотоперетворювачів є складною, оскільки для гальванічного узгодження каскадів між собою потребує використання тунельних переходів. Істотним недоліком такого типу структур є необхідність в підборі матеріалів, з яких виготовляються тунельні діоди. Оскільки, максимальний струм тунелювання зменшується із збільшенням ширини забороненої зони матеріалу, з якого виготовлений тунельний діод, то для сонячних елементів, що працюють при високих ступенях концентрації, необхідно зменшувати ширини забороненої зони матеріалу тунельного діода, а це погіршує узгодження між верхніми р-п переходами каскадного фотоелектричного перетворювача.

Другий підхід, що може вирішити проблему збільшення частотної смуги сонячного світла, яка поглинається із фотогенерацією носіїв і відповідно підвищити коефіцієнта корисної дії ФЕП, базується на використанні активних шарів у вигляді твердих розчинів із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку. Епітаксійні структури такого типу, як правило, виготовляються з одним р-п переходом, що спрощує технологію їх

виготовлення і полегшує формування високоякісних (з низькою концентрацією дефектів) активних областей фотоперетворювачів.

2.1. Відпрацювання оптимальних режимів кристалізації буферних плівок n-GaAs та p+-GaAs.

2.1.1. Відпрацювання оптимальних режимів кристалізації буферних плівок n-GaAs та p+-GaAs

Рідиннофазна епітаксія (РФЕ) відноситься до промислових методів отримання епітаксійних структур для сонячних елементів (СЕ) на основі матеріалів АЗВ5, та може бути використана для кристалізації такого типу структур. Найбільший інтерес викликає її різновид – низькотемпературна рідиннофазна епітаксія (НТРФЕ), що передбачає кристалізацію шарів із обмеженого об'єму розчину-розплаву за температур 300–600°C. Мінімальні швидкості росту становлять 0,1–1 нм/с, що можна порівняти із швидкостями росту в методах МОС-гідридної епітаксії та МПЕ [46,47]. На початковій стадії кристалізації реалізується пошаровий механізм росту, що забезпечує планарність гетерограниць і дозволяє отримувати високоякісні гетероструктури з товщинами окремих шарів до 2 нм [48], а також квантово-розмірні об'єкти – квантові точки.

Для проведення наших досліджень було вибрано систему GaAs(AlGaAs). Фотоелектричні перетворювачі на основі цієї системи можуть перетворювати сонячне світло у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні, а мінімальна розбіжність параметрів ґратки (не більше 0,1%) між GaAs і AlGaAs забезпечує кристалізацію активних шарів з низькою концентрацією дефектів.

Оптимізація режиму росту буферного шару

Для отримання гетероструктур в системі GaAs-AlGaAs була використана установка РФЕ на основі СДО-125. Процес епітаксії проводили у горизонтальному реакторі. Необхідну степінь чистоти водню забезпечувала установка ОДВ-50. В реакторі розміщується графітова касета, взаємне переміщення деталей котрої здійснюється молібденовими штоками. Ізотермічна зона у печі забезпечується натрієвою тепловою трубою.

Техніка вироцування багатшарових структур методом РФЕ включає в себе послідовне приведення в контакт з підкладкою розплавів із різним вмістом компонентів, і відповідно, послідовну кристалізацію шарів заданої товщини і складу. Важливим моментом є

вдалий вибір конструкції касети. Кристалізація здійснюється із обмеженого по товщині (≈ 1 мм) ростового зазору. Зміна розчинів-розплавів здійснюється примусовим протисканням попереднього розплаву наступним.

Для нарощування гетероструктури поверхню підкладки перед початком епітаксійного росту піддавали хімічній обробці у поліруючих травниках для видалення порушеного шару [49]. Відпрацьований режим травлення підкладки GaAs безпосередньо у розчині-розплаві під час проведення технологічного процесу для отримання буферного шару n-GaAs з контрольованою густиною дислокацій і хорошою морфологією. Температурний інтервал було вибрано з врахуванням можливості нарощування решти епітаксійних шарів, що складають гетероструктуру для SE з заданими параметрами. Температурно-часовий режим процесу підтравлення підкладки GaAs та нарощування буферного шару n-GaAs приведено на рис. 2.1.

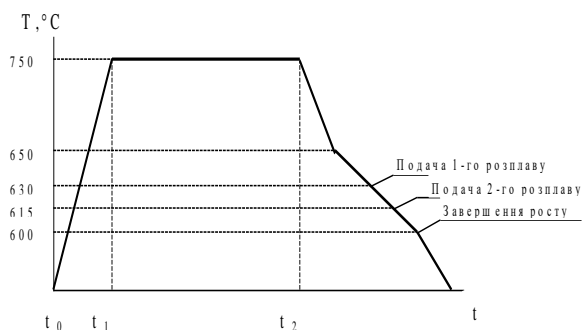


Рис. 2.1 – Температурно-часовий режим нарощування буферного шару n-GaAs.

В табл. 2.1. вказано компоненти шихти, які застосовували для підрозчинення підкладки та нарощування буферного шару. Наважки легуючої домішки у розплаві визначали на основі даних по відношенню концентрації носіїв олова у рідкій фазі. За температури $T_1=750$ °C проводили гомогенізацію розчинів-розплавів впродовж 1,5 год. В момент часу t_2 включали різке зниження температури зі швидкістю 2,5–3 °C/хв. При досягненні температури ~ 650 °C швидкість охолодження зменшували до 1,2–1,8 °C/хв. За температури 630 °C в

ростовий зазор подавали перший розплав, котрий не насичений по GaAs. Відбувалося підтравлення підкладки впродовж 3–4 хв.

Таблиця 2.1 – Компоненти шихти для нарощування буферного шару n-GaAs.

Епітаксійний шар	Компоненти шихти			
	1-й розчин-розплав	2-й розчин-розплав		
	Ga, г	Ga, г	GaAs, мг	Sn, мг
Розчин-розплав для підтравлення підкладки	5	–	–	–
Буферний шар n-GaAs	–	5	20,1	5

При досягненні температури 615 °С у ростовий зазор подавали другий розчин-розплав, котрий насичений за температури 640 °С. В інтервалі температур 615–600°С відбувалося кристалізація буферного шару товщиною 3,0–5,0 мкм із концентрацією носіїв $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Експериментально було встановлено, що саме такий склад розчину-розплаву для підтравлення забезпечує планарне травлення підкладки на глибину 14–15 мкм. Використання недонасичених розплавів для травлення підкладки у такому температурному діапазоні росту не забезпечує хорошої морфології поверхні буферних шарів.

Легування епітаксійних шарів GaAs за низьких температур

Зменшення концентрації неконтрольованих домішок в епітаксійних шарах є істотним етапом відпрацювання технологічних режимів їх легування, оскільки, ці домішки приймають активну участь у формуванні складних дефектів та асоціативів в напівпровідниках здатних переводити легуючі акцепторні чи донорні домішки в електрично неактивну форму.

Існує кілька способів, які дозволяють зменшити фоновий рівень легування, однак найбільш ефективним виявилось застосування рідкісноземельних елементів (РЗЕ) і алюмінію в рідиннофазній епітаксії матеріалів АЗВ5 [50–52]. Додавання РЗЕ в розплав сприяє зменшенню концентрації електронів в шарах, аж до інверсії типу провідності з електронного в дірковий за певних критичних концентрацій. Проте, присутність одночасно в розплавах таких хімічно активних елементів, як РЗЕ та алюмінію, стимулює процеси перерозподілу легуючих домішок по підрешітках, утворення

комплексів та їх хімічну взаємодію між собою. Наслідком такої взаємодії є зміна вже відомих залежностей розподілу концентрації електронів та дірок від кількості легуючих донорних та акцепторних домішок. Важливим при цьому є вибір домішок, котрі б не утворювали хімічних сполук з РЗЕ. Найбільш стійким хімічним елементом, який майже не взаємодіє в галієвих та індієвих розплавах із РЗЕ є олово [53]. Із інших донорних домішок відносно стійким є телур. Серед акцепторних домішок, придатних для застосування в РФЕ та відносно стійких до взаємодії з РЗЕ є Ge, Mg [54].

Для дослідження процесів легування донорними та акцепторними домішками, епітаксійні шари GaAs нарощувались в інтервалі температур 630-570 °С. На рис. 1.2. приведені залежності концентрації електронів від кількості олова в розплаві галію, в котрому були також присутні в оптимальних кількостях ітербій (0,03 ат.%) та алюміній ($3 \cdot 10^{-3}$ ат.%).

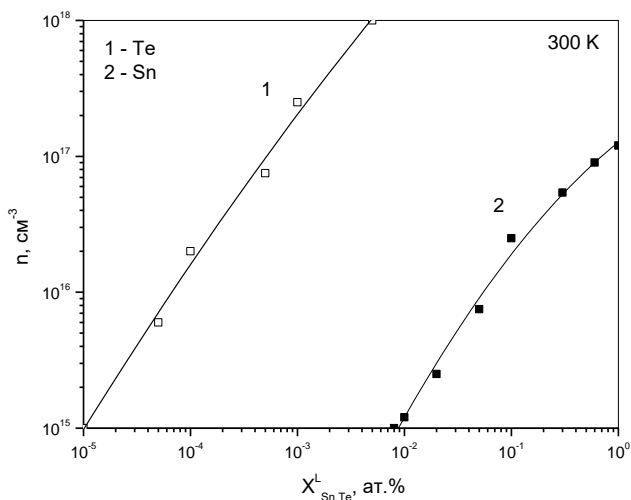


Рис. 2.2 – Залежності концентрації електронів від кількості телуру (1) та олова (2) в розплаві галію, при оптимальних кількостях ітербію (0,03 ат.%) та алюмінію ($3 \cdot 10^{-3}$ ат.%).

Як бачимо з рис. 2.2, концентраційна залежність електронів в шарах GaAs (крива 1), легованих Te в діапазоні від $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ ат%, має лінійний характер. Концентраційна крива 2 електронів в шарах,

легованих Sn, втрачає свій лінійний хід і починає прямувати до насичення при кількостях олова в розплаві, що перевищують $5 \cdot 10^{-2}$ ат%.

На рис. 2.3. приведено залежність концентрації дірок від кількості магнію (крива 1), та германію (крива 2) в шарах, отриманих із розплавів галію, комплексно легованих оптимальними кількостями ітербію та алюмінію. Криві 1 та 2 є лінійними у всьому дослідженому діапазоні концентрацій магнію та германію.

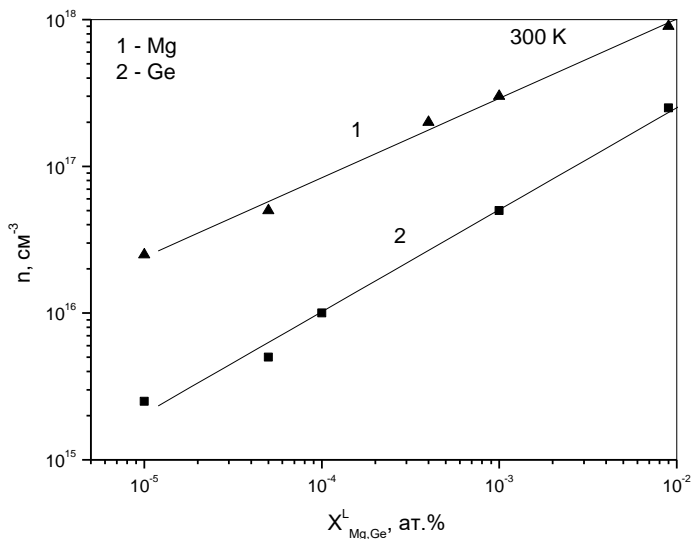


Рис. 2.3 – Залежності концентрації дірок від кількості магнію (крива 1), та германію (крива 2) в шарах GaAs, отриманих із розплавів галію, комплексно легованих оптимальними кількостями ітербію (0,03 ат.%) та алюмінію ($3 \cdot 10^{-3}$ ат.%).

Наші дослідження показали [55–57], що найбільш зручні з технологічної точки зору домішки Sn, Mg та Ge разом із комплексним легуванням розплавів галію ітербієм та алюмінієм, забезпечують в низькотемпературному варіанті РФЕ отримання епітаксійних шарів з концентраціями, які гарантують створення високоякісних оптоелектронних приладів.

2.1.2. Оцінка оптимальних градієнтів ширини забороненої зони плівок твердого розчину AlGaAs

Технологія отримання гетероструктур GaAs/AlGaAs з одним р-п переходом методом РФЕ є відомою та відпрацьованою [58]. Саме ця технологія, поєднуючи епітаксійні методи із дифузійними, дозволяє створити високоякісний р-п перехід, котрий є просторово зміщений від металургійної границі розділу шарів епітаксійної структури. Максимальне на сьогодні досягнуте значення ККД СЕ на основі гетероструктур GaAs/AlGaAs з одним р-п переходом становить 27,6% [59] при AM1.5, тоді як теоретичною межею є значення ККД -28%. Найвищу ефективність фотоелектричного перетворення серед гетероструктур з одним р-п переходом можуть забезпечувати гетероструктури з активним шаром у виді варізонного твердого розчину AlGaAs, ширина забороненої зони котрого зростає до поверхні. Для оцінки оптимальних значень електрофізичних параметрів такого варізонного шару нам необхідно визначити ті із них, що спричиняють найбільший вплив на величину ККД ФЕП. До них слід віднести такі:

- дифузійну довжину неосновних носіїв заряду в активному шарі;
- концентрацію AlAs в складі твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$;
- оптимальну товщину твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$.

Одним із основних параметрів напівпровідникового матеріалу, котрий визначає ефективність СЕ є дифузійна довжина неосновних носіїв заряду [60]. Верхня межа концентрації AlAs в складі твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ визначається хімічною стійкістю до парів води і не може перевищувати 60 мол.%. Оптимальна товщина шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ залежить від дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в активному шарі.

Слід зазначити, що важливе значення має також технологія отримання поверхневого шару гетероструктури котрий відіграє роль широкозонного вікна та пасивує поверхневі стани на поверхні структури, які відповідальні за рекомбінаційні втрати [61].

Дифузійна довжина, як відомо, визначається структурною досконалістю та концентрацією неконтрольованих домішок в епітаксійних шарах, що утворюють р-п перехід. Тому зменшення неконтрольованих домішок та вибір типу легуючої домішки є дуже важливим для отримання високоякісних гетероструктур для фотоперетворювачів сонячної енергії.

Встановлення природи фонових домішок в базових шарах n-GaAs та оцінка їх структурної досконалості здійснювали на основі спектрів, отриманих методом низькотемпературної фотолюмінесценції (ФЛ). Дослідження проводили за температури 10 К. Збудження ФЛ здійснювали аргонним лазером з довжиною хвилі 514,5 нм. В спектрах фотолюмінесценції порівнювали інтенсивності піків екситонної люмінесценції, а також співвідношення інтенсивностей екситонних і домішкових люмінесцентних піків, отриманих від епітаксійних шарів n-GaAs, кристалізованих із нелегованих галієвих розчинів-розплавів та комплексно легованих оптимально підібраними співвідношеннями Al та Yb. Експериментальні дослідження спектрів фотолюмінесценції шарів n-GaAs, отриманих із нелегованих галієвих розчинів-розплавів та комплексно легованих Al та Yb показали, що структура цих спектрів зазнає суттєвих змін під впливом легування (рис. 2.4).

Спільним для цих спектрів є те, що в обох із них є екситонні та домішкові піки з максимумами 820 нм та 831 нм, котрі, проте, суттєво відрізняються за інтенсивностями (рис. 2.4а, б). В нелегованих епітаксійних шарах n-GaAs інтенсивність екситонного піка мала у порівнянні із інтенсивністю домішкового екситонного піка. В епітаксійних шарах n-GaAs, комплексно легованих Al та Yb, картина суттєво змінюється. Тут інтенсивність екситонного піка різко зростає, а домішкового значно зменшується, що може свідчити про покращення структурної досконалості епітаксійних шарів. Не менш цікаві особливості спостерігаємо аналізуючи більш довгохвильову ділянку спектрів фотолюмінесценції.

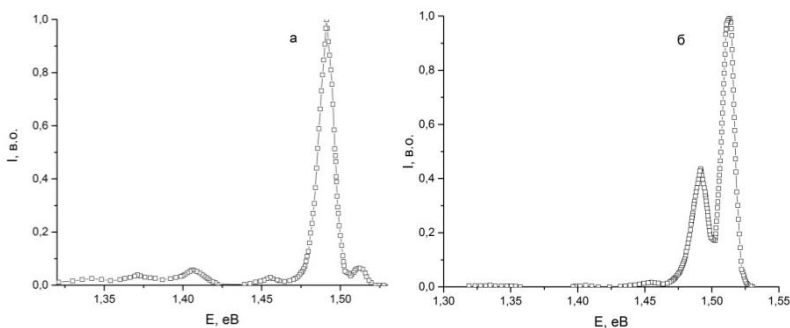


Рис. 2.4 – Спектри ФЛ (10 К) епітаксійних шарів GaAs, нелегованих (а) та легованих оптимальною кількістю Yb та Al (б).

В спектрах, виміряних на нелегованих зразках (рис. 2.4а), існує декілька смуг з максимумами 852 нм, 881 нм, 925 нм. Смугу з максимумом за 852 нм інтерпретуємо як донорно-акцепторний перехід (D-A), де в якості донора є вуглець на місці вакансії галію ($D-C_{Ga}$), а акцептором - кремній у підрешітці миш'яку ($A-Si_{As}$). Більш інтенсивна смуга з максимумом за 881 нм відповідає зона-акцепторному переходу, де акцептором є марганець Mn. Досить широка смуга з максимумом за 925 нм зумовлена зона-акцепторним переходом, де акцептором є Cu_{Ga} та переходом - "акцептор-комплекс $V_{As}Cu_{Ga}V_{As}$ ". У спектрах епітаксійних шарів, легованих Al та Yb, всі ці три смуги відсутні, або їх інтенсивність є на рівні фону. Кремній, марганець, мідь та вуглець є типовими домішками в GaAs, джерелом котрих є компоненти шихти, устаткування та технологічні гази. Їх вплив на електрофізичні та оптичні властивості GaAs визначається технологічними умовами отримання епітаксійних шарів та взаємодією із точковими дефектами кристалічної ґратки. Отже, введення в розчин-розплав одночасно Al та Yb в оптимально підібраних концентраціях суттєво впливає на вміст у шарах, що кристалізуються, неконтрольованих фонових домішок і власних дефектів кристалічної структури. Це підтверджується, зокрема, результатами вимірювань дифузійної довжини неосновних носіїв в епітаксійних шарах n-GaAs, отриманих із галієвих розчинів-розплавів, нелегованих, та комплексно легованих Al та Yb. Найвищі значення дифузійної довжини $L_p=11$ мкм досягалися в шарах n-GaAs отриманих із розплавів галію, комплексно легованих Al ($4 \cdot 10^{-2}$ ат.%) та Yb ($1,5 \cdot 10^{-2}$ ат.%), тоді як в шарах, вирощених із галієвих розплавів значення $L_p=4,5-5,0$ мкм.

Проте, за концентраціями Yb $1,5 \cdot 10^{-2}$ ат.% дещо погіршується морфологія епітаксійного шару, що виявляється у збільшенні висоти терас, характерних для шарів отриманих РФЕ. Це спричиняє негативний вплив на характеристики р-n переходу, котрий формується на поверхні шару n-GaAs. Тому, оптимальними з точки зору отримання високоякісних р-n переходів, є галієві розплави, леговані Al ($4 \cdot 10^{-2}$ ат.%) та Yb ($1 \cdot 10^{-2}$ ат.%).

Дифузійну довжина неосновних носіїв досліджували з використанням бар'єру Шотткі [62,63]. Тестові зразки діодів Шотткі виготовлялись методом вакуумного напиленням плівок золота на поверхню окремо вирощених базових епітаксійних шарів n-GaAs.

Ємність діода вимірювалась на частоті 1МГц. Фотострум збуджувався світловим променем модульованим з частотою ~ 100 Гц. Результати проведених досліджень приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Дифузійна довжина неосновних носіїв заряду в шарах твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ($x_{Al}^L = 1 \cdot 10^{-3}$ ат%).

$x_{Yb}^L, \text{ ат}\%$	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
$L_p, \text{ мкм}$	2,5	4,94	8,2	10,7	2,1

Отже, як бачимо з табл. 2.2, дифузійна довжина дірок в шарах n-GaAs, отриманих за таких технологічних умов може перевищувати 10 мкм. Базуючись на отриманих даних можна зробити висновок, що товщина шару твердого розчину буде в межах 4-8 мкм. За менших товщин важко відтворювано отримати оптимальну крутизну наростання вмісту AlAs в шарі твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$. За більших товщин фотогенеровані носії заряду можуть частково рекомбінувати в товщі шару ще до їх розділення p-n переходом.

Вибір оптимальних значень градієнта (dz/dx) складу проведено, виходячи із відомого виразу для дифузійно-дрейфової довжини:

$$L_{dr} = 2 \left[-\frac{1}{kT} \left| \frac{dE_g}{dx} \right| + \sqrt{\left(\frac{1}{kT} \frac{dE_g}{dx} \right)^2 + \frac{4}{L_{dif}^2}} \right]^{-1}. \quad (0.18)$$

Очевидно, квазіелектричне поле буде суттєво впливати на просторовий розподіл фотоносіїв, а значить, на коефіцієнт їх збирання, за умови:

$$\frac{1}{kT} \left| \frac{dE_g}{dx} \right| = \frac{1}{kT} \frac{dE_g}{dz} \left| \frac{dz}{dx} \right| \gg \frac{2}{L_{dif}}. \quad (0.19)$$

Приймаючи, що в $Al_xGa_{1-x}As$ $dE_g/dz \sim 1,5$ eV, $kT = 0,025$ eV ($T = 300$ K), $L_{dif} = 5$ мкм, отримаємо

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| \gg \gg 0,007. \quad (0.20)$$

Коли умова (0.19) виконується, вираз для L_{dr} зводиться до наступного:

$$L_{dr} = L_{dif}^2 \frac{1}{kT} \frac{dE_g}{dz} \left| \frac{dz}{dx} \right|. \quad (0.21)$$

Для усунення рекомбінаційних втрат фотоносіїв в об'ємі та на фронтальній поверхні потрібно, щоб виконувались нерівності:

$$L_{dr} \gg d, \quad (0.22)$$

(d – товщина фотоактивного шару),

$$v_{dr} = \frac{D}{kT} \frac{dE_g}{dz} \left| \frac{dz}{dx} \right| \gg S, \quad (0.23)$$

де D – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду, S – швидкість поверхневої рекомбінації.

На основі (0.22), (0.23) з врахуванням (0.21) отримаємо такі нерівності:

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| \gg \frac{d}{1500} \text{ (мкм}^{-1}\text{)}, \quad (0.24)$$

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| \gg \frac{S}{1500D} = \frac{S\tau}{1500L_{dif}^2} \text{ (мкм}^{-1}\text{)} \quad (0.25)$$

беручи значення $S=108$ мкм/с, $\tau=10^{-4}$ с, $L_{dif}=5$ мкм отримаємо, що

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| \gg 0,3 \text{ (мкм}^{-1}\text{)} \quad (0.26)$$

На основі вище представлених результатів дослідження можна зробити висновок, що вибір оптимального значення градієнта складу диктується необхідністю виконання таких умов:

- внутрішнє квазіелектричне поле, зумовлене градієнтом краю зони неосновних носіїв, має бути таким, за якого рекомбінаційні втрати фотоносіїв в об'ємі фотоактивного шару та на його фронтальній поверхні, є мінімальними;
- перепад ширини забороненої зони у фотоактивному шарі повинен бути якомога більшим, що дозволило б збільшити поглинання падаючого випромінювання та ККД СЕ.

2.2. Апробація методики та вибір технологічних режимів отримання градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs із насичених розчинів-розплавів галію за модульованого зниження температури кристалізації

2.2.1. Відпрацювання технології формування градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs за модульованого зниження температури кристалізації

Відпрацювання технології формування градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs методом рідиннофазної епітаксії здійснювали на установці з горизонтальним реактором (фотографія котрої показана рис. 2.5). Для забезпечення максимальної чистоти технологічного процесу використовували вдосконалений затвор реактора, який обладнаний камерою-шлюзом для завантаження графітової касети із підклакою і шихтою у технологічний реактор. Фотографія вдосконаленого затвора реактора із камерою-шлюзом показана на рис. 2.6.

Реактор розміщували у трьохсекційній печі. Розбіжність температури по довжині ізотермічної зони не перевищує $0,5^{\circ}\text{C}$. Температура в робочій зоні реактора контролювали за допомогою платино-платинородієвої термопари.

Для того щоб позбутись впливу кремнію, який потрапляє в розплав із кварцового реактора ми використали графітову касету та великі протоки водню через реактор (4-5 л/хв). Це забезпечувало видалення основної кількості відновленого воднем SiO із стінок реактора. В якості металу розчинника використовувався галій. Насичуючим матеріалом був полікристалічний арсенід галію.



Рис. 2.5 – Установка рідиннофазної епітаксії, яку використовували для формування градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs.

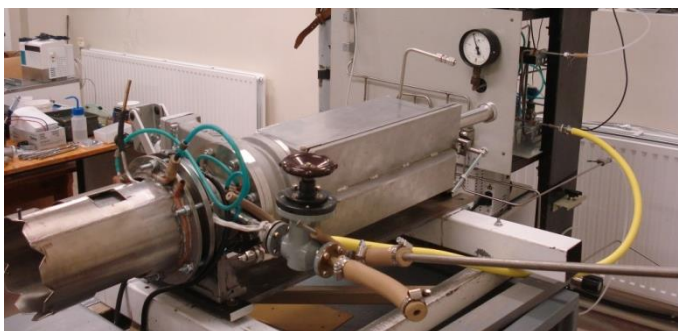


Рис. 2.6 – Затвор реактора із камерою-шлюзом для завантаження графітової касети.

Апробовані дві методики модуляції швидкості кристалізації для отримання градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs з насичених розчинів-розплавів галію та вибору оптимальних технологічних режимів. Обидві методики базуються на додатковому примусовому імпульсному збільшенні швидкості охолодження технологічного середовища – насиченого розчину-розплаву галію, що контактує із підкладкою арсеніду галію. Методики відрізняються способом збільшення швидкості охолодження понад сталу її величину задану системою регулювання температури. Перший спосіб базується на введенні холодного тіла (графітового циліндра) із холодної зони реактора в робочу зону де розміщена графітова касета. Схематично апаратне оформлення цього способу формування варізонних шарів AlGaAs з градієнтним розподілом легуючих домішок зображено на

рис. 2.7. В процесі реалізації цього способу використовували графітову поршневу касету, фотографія якої представлена на рис. 2.8.

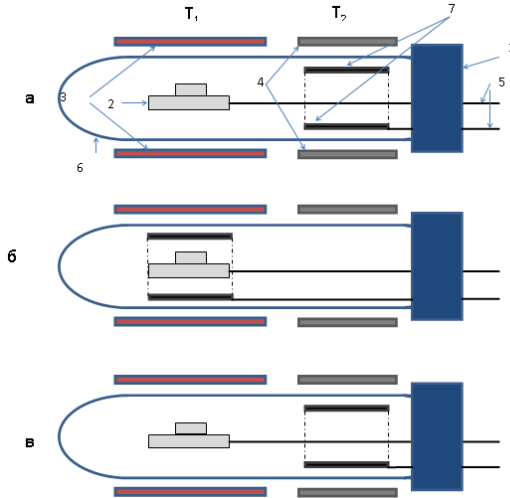


Рис. 2.7 – Апаратне оформлення технологічного процесу формування варізонних шарів з градієнтним розподілом легуючих домішок методом рідиннофазної епітаксії шляхом введення холодного тіла в робочу зону реактора: 1 – затвор для герметизації кварцового реактора; 2 – графітова касета; 3 – робоча температурна зона; 4 – допоміжна температурна зона ($T_2 < T_1$); 5 – молібденова тяга; 6 – кварцовий реактор; 7 – графітовий циліндр.



Рис. 2.8 – Графітова поршнева касета для кристалізації варізонних шарів з градієнтним розподілом легуючих домішок методом рідиннофазної епітаксії шляхом введення холодного тіла в робочу зону реактора.

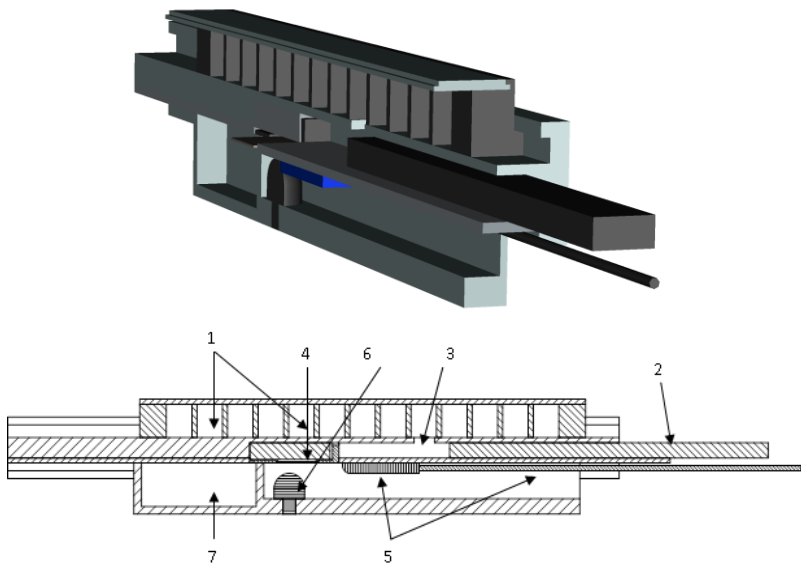


Рис. 2.9 – Схематичне зображення графітової поршневої касети спеціальної конструкції, що передбачає різке охолодження підкладки: 1 – комірочки для розчинів-розплавів; 2 – поршень; 3 – поршнева камера; 4 – підкладка; 5 – холодне тіло на тримачі, що може переміщуватись зворотно-поступально; 6 – фіксатор-притискач холодного тіла; 7 – камера для відпрацьованих розчинів.

Другий спосіб базується на імпульсному охолодженні безпосередньо підкладки на якій формується епітаксійний шар. Для забезпечення максимального імпульсного охолодження підкладки графітова касета має таку конструкцію, за якої забезпечується контакт холодного тіла (графітової пластини) із підкладкою з іншого боку котрої знаходиться насичений розчин-розплав галію (рис. 2.9). Оскільки, товщина підкладки незначна (400-500 мкм) то швидкість охолодження може регулюватись в значному інтервалі від одиниць до декількох десятків градусів. Одночасно з цим, конструкція касети забезпечує можливість кристалізації багат шарової структури з легуванням шарів домішками різної природи.

2.2.2. Кристалізація градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs за модульованого зниження температури

Базовий підхід до кристалізації градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs методом РФЕ базується на залежності коефіцієнтів сегрегації більшості домішок в напівпровідниках від швидкості кристалізації, що тотожно швидкості охолодження технологічного середовища. Істотна зміна швидкості охолодження при кристалізації епітаксійних шарів наприклад GaAs впливає на коефіцієнт сегрегації легуючих чи фонових (неконтрольованих) домішок, який визначається згідно виразу:

$$K_s = C^s/C^l, \quad (0.27)$$

де K_s – коефіцієнт сегрегації, C_{Te}^s – концентрація атомів легуючої домішки в епітаксійному шарі GaAs, C_{Te}^l – концентрація атомів легуючої домішки в розчині-розплаві Ga.

Оскільки маса графітової касети невелика нарощування шарів проводиться з тонких ростових зазорів (0,5 – 0,8 нм) розчину-розплаву, то його температура змінюється синхронно із термооб'ємом. Як показали наші експерименти, зміна швидкості зниження температури в 2-3 рази може істотно збільшити коефіцієнт сегрегації домішок різної природи. Тому, на невеликих товщинах шарів (декілька мікрон) вдається досягнути значної, майже на порядок, зміни концентрації як носіїв заряду так і складу твердого розчину величина градієнту яких визначається природою домішки.

Викладений вище технологічний підхід до керування профілями розподілу концентрації носіїв заряду в епітаксійних шарах модуляцією швидкості зниження температури та вибором природи домішок, може бути застосований для формування контактних систем, різних профілів на границях розділу епітаксійних шарів чи кристалізації активних шарів із потрібним градієнтним розподілом концентрації носіїв чи ширини забороненої зони. Для оптимізації технологічних режимів отримання градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs, що утворюють активну область SE, нами були використані обидва описані способи модуляції швидкості кристалізації.

На рис. 2.10. приведено типові результати залежності концентрації носіїв заряду і параметра «х» в епітаксійних шарах GaAs

та твердих розчинах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Zn}$ отриманих згідно описаних вище методик модуляції швидкості зниження температури.

Відомо, що контактний шар в епітаксійній структурі повинен характеризуватись великою концентрацією носіїв, яка як правило перевищує величину $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, оскільки, при такому рівні концентрацій можна забезпечити якісний омичний контакт приладової структури. Найкращими властивостями володіє контактний шар профіль розподілу концентрацій в якому є варізонним причому із зростанням концентрації носіїв до його поверхні. Оскільки, при цьому виконуються принаймні дві основні вимоги до контактного шару в приладовій структурі. Першою із них є добре узгодження по концентрації менш легованої частини контактного шару із частиною приладової епітаксійної структури, що знаходиться під контактним шаром, а з іншого боку – добре узгодження верхньої сильно легованої частини із металізацією. Введення великих концентрацій легуючої домішки (більше $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в контактний шар призводить до зміни параметра ґратки, а отже, виникнення на границі розділу механічних напружень, здатних генерувати різного типу дефекти. Тому, другою важливою перевагою контактного шару з градієнтним розподілом домішки є можливість зменшити напруження на границі розділу контактного шару з активним шаром приладової структури завдяки плавному розподілу по всій товщині шару. Проблема границі розділу з контактним шаром, ще більше ускладнюється, якщо легуюча домішка, що використовується в контактному шарі, володіє великим коефіцієнтом дифузії. Найчастіше, за необхідності, для вирішення цієї проблеми формують принаймні два шари з наростаючою до поверхні концентрацією носіїв заряду. Тобто, створення контактної система шарів значно ускладнює технологію її виготовлення та підвищує вартість.

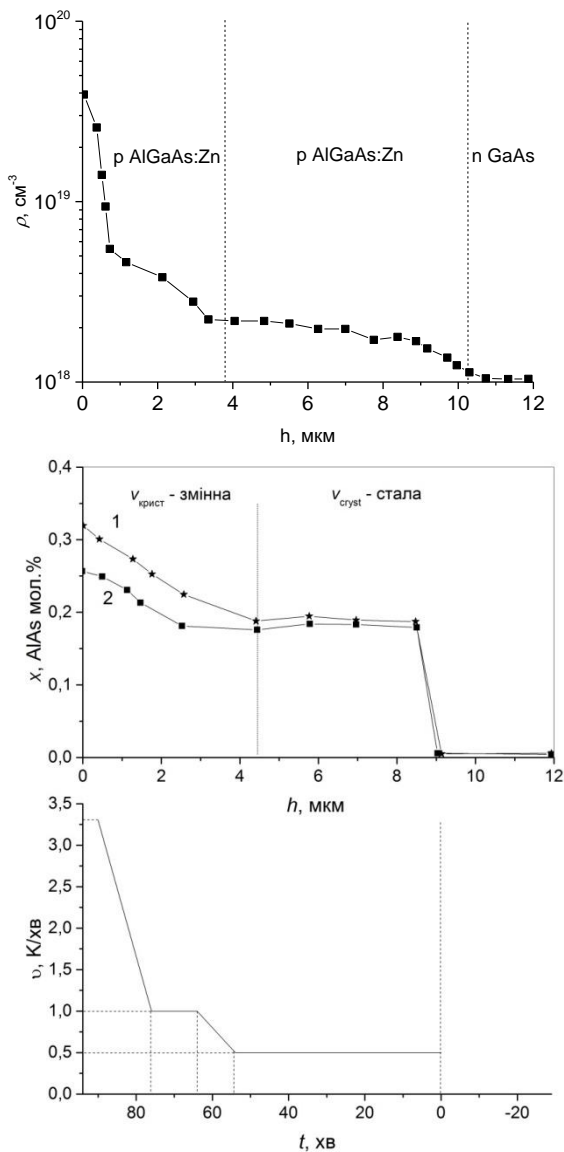


Рисунок 2.10 – Залежності концентрації носіїв заряду та параметра « x » в епітаксійних шарах GaAs і $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Zn}$ отриманих згідно описаних вище методик модуляції швидкості зниження температури.

При кристалізації епітаксійного шару твердого розчину арсеніду галію легованого цинком в кількості 0,01 ат% методом рідиннофазної епітаксії в інтервалі температур 650 -530 °С із зміною швидкості зниження температури від 0,5 °С/хв до 2,5-3,3 °С/хв на кінцевій стадії кристалізації, вдалося сформувати градієнтний розподіл концентрації дірок по товщині (рис. 2.10а).

Цей шар був кристалізований із одного розчину-розплаву без введення металургійної границі шарів. Як бачимо з рис. 2.10, модуляція швидкості зниження температура за фіксованої кількості легуючої домішки у розплаві, дозволяє формувати градієнтний профіль розподілу концентрації дірок в епітаксійному шарі. В частині шару, що є дотичною до підкладки, концентрація дірок становить величину $\approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а на поверхні, концентрація зростає аж до величини $\approx 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2.10 приведено профілі розподілу складу твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, що визначається параметром «х». Крива 1 отримана на зразку котрий кристалізувався за методикою згідно якої «холоднее тіло» контактувало безпосередньо із підкладкою. Крива 2 отримана на зразку, який охолоджувався разом із графітовою касетою після введення масивного циліндричного тіла в робочу зону реактора. Як бачимо із рисунку за сталої швидкості кристалізації (швидкість зниження температури системи рівна 0,5°С/хв) склад твердого розчину є постійним (рівним $\approx 0,2$) і визначається концентрацією алюмінію у розчині-розплаві, а при її зростанні до 3,3°С/хв значення «х» зростає і на поверхні досягає величини 0,26 для зразка 1 і 0,32 для зразка 2. Профіль розподілу складу твердого розчину зразка 2 є оптимальним для активної варізонної області фотоелектричного перетворювача. Цей профіль був отриманий завдяки імпульсній швидкості охолодження підкладки в момент кристалізації варізонної його частини, що становила $\approx 10,0 \text{ °С/хв}$. Отже, в результаті проведених експериментів встановлено оптимальні технологічні режими формування варізонних активних шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, які було використано в складі СЕ на основі епітаксійної структури $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

2.3. Виготовлення варізонних епітаксійних гетероструктур AlGaAs \ GaAs. Відпрацювання базових фізико-хімічних аспектів формування властивостей гетеросистем AlGaAs \ GaAs з нанорозмірними об'єктами.

2.3.1. Виготовлення варізонних епітаксійних гетероструктур AlGaAs \ GaAs

Для виготовлення варізонних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs, що утворюють активну область фотоелектричного перетворювача сонячної енергії, нами було використано методики рідиннофазної епітаксії із застосуванням модуляції швидкості кристалізації, які детально описані у звіті за попередній етап роботи. З метою забезпечення високої керованості профілем розподілу алюмінію по товщині шару твердого розчину, а відповідно і співвідношення AlAs/GaAs у твердому розчині $Al_xGa_{1-x}As$ його кристалізацію здійснювали з двох розчинів-розплавів. Перший із них дозволяє формувати при постійній швидкості зниження температури $0,5\text{ }^\circ\text{C/хв}$ твердий розчин $Al_xGa_{1-x}As$ із значеннями $x=0,1$, а другий - твердий розчин $Al_xGa_{1-x}As$ із значенням $x=0,2$. Завдяки модуляції швидкості зниження температури тобто додатковому різкому збільшенні швидкості зниження до $(3-3,5)\text{ }^\circ\text{C/хв}$, при подачі кожного із розчинів розплавів у ростовий зазор, вдалось отримати профіль розподілу "x" по товщині твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ який показано на рис. 2.11.

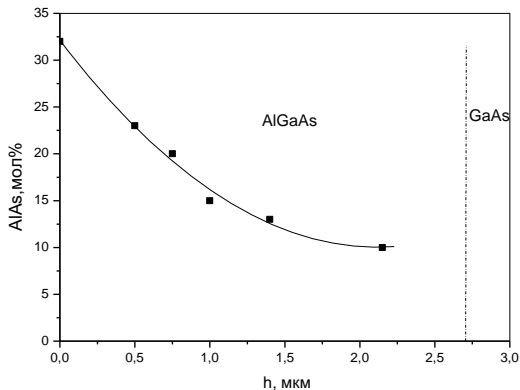


Рис. 2.11 – Профіль розподілу AlAs за товщиною шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ у варізонній епітаксійній гетероструктурі GaAs\AlGaAs.

Цей спосіб формування варізонних шарів передбачає можливість регулювання складу твердого розчину не тільки зміною коефіцієнта сегрегації алюмінію завдяки модуляції швидкості зниження, але й оптимальним підбором концентрації алюмінію у першому і другому розчині-розплаві. Дослідження профілю розподілу алюмінію по товщині шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ здійснювали з використанням мікрорентгеноструктурного аналізу. Діаметр електронного зонду мікроаналізатора становив 1 мкм. Для дослідження було підготовлено спеціальний зразок з використанням косоного шліфа. На рис. 2.11 приведено найбільш оптимальний профіль “х” по товщині шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ визначений нами на основі теоретичних оцінок виконаних на попередньому етапі роботи.

2.3.2. Дослідження профілю розподілу концентрації носіїв заряду у варізонних епітаксійних структурах AlGaAs / GaAs

Для оптимізації профілю розподілу концентрації носіїв заряду у варізонних епітаксійних шарах гетероструктур AlGaAs \ GaAs було проведено низку експериментів. На першому етапі уточнювали концентрацію цинку в розчині-розплаві, яка за температур епітаксії 630-570 °C забезпечує потрібну нам оптимальну концентрацію дірок в епітаксійних шарах твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$. Дослідження проводили на твердих розчинах із значенням $x=0,2$ приблизно дві третіх товщини яких було отримано за постійної швидкості зниження температури рівної 0,5 °C/хв, а решта товщини за умов наростання швидкості кристалізації від 0,5 °C/хв до 3–3,5 °C/хв. Кристалізацію цих шарів здійснювали на поверхні буферного шару GaAs n-типу провідності. В табл. 2.3. приведено основні дані по компонентах шихти з якої кристалізували шари твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$, а також концентрацію дірок в епітаксійних шарах визначену за результатами C-V електропрофілювання.

Таблиця 2.3 – Компоненти шихти для синтезу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ та результати C-V електропрофілювання твердих розчинів

№ зразка	Наважка Ga, г	Наважка Zn, мг	Кількість Zn/1г Ga, мг	Концентрація дірок в епітаксійному шарі p, cm^{-3}
0729	5,16	0,65	0,125	$1 \cdot 10^{17}$
0912	5,1	2,5	0,49	$3 \cdot 10^{17}$
0919	5,05	4,1	0,81	$9 \cdot 10^{17}$
0914	5,02	5,2	0,97	$1,04 \cdot 10^{18}$

На рис. 2.12 і 2.13 приведено профілі розподілу електронів і дірок у двох досліджуваних епітаксійних структурах $\text{AlGaAs} \setminus \text{GaAs}$, що відрізнялись різним рівнем легування цинку. Як бачимо з рисунків границя розділу між шарами $\text{AlGaAs} \setminus \text{GaAs}$ різного типу провідності є різкою. Ділянка шару p-GaAs, що отримана за постійного значення швидкості зниження температури є однорідною.

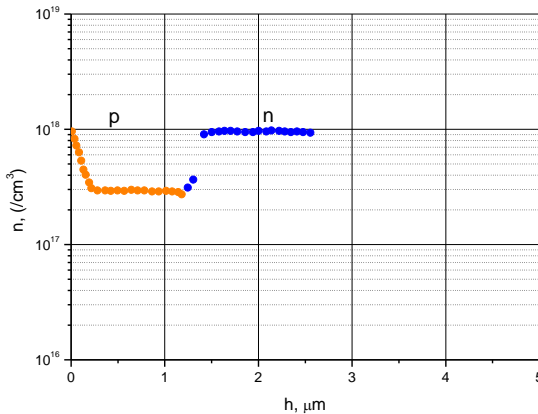


Рис. 2.12 – Профіль розподілу електронів і дірок в епітаксійній структурі $\text{AlGaAs} \setminus \text{GaAs}$ № 0912.

При відпрацюванні експериментів ми зіткнулись із проблемою неоднорідності деяких підкладок арсеніду галію, що використовувались в наших експериментах, яка виявлялась у зростанні концентрації електронів у буферному шарі n-типу провідності понад нормовану

паспортом. Спостерігалось зростання концентрації електронів від $1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ аж до $1,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Тому, для перевірки можливого впливу деяких технологічних факторів на електрофізичні параметри, отримуваних нами шарів, було кристалізовано епітаксійну структуру GaAs\AlGaAs на поверхні напівізолюючої підкладки GaAs.

Результати C-V електропрофілювання отриманого зразка приведено на рис. 2.14. Як бачимо з рис. 2.14 обидві границі розділу між шарами n- і p- типів провідності та між шаром p- і напівізолюючою підкладкою є різкими, що підтверджує правильний вибір технологічних режимів кристалізації епітаксійної структури AlGaAs \ GaAs.



Рис. 2.13 – Профіль розподілу електронів і дірок в епітаксійній структурі AlGaAs \ GaAs № 0914.

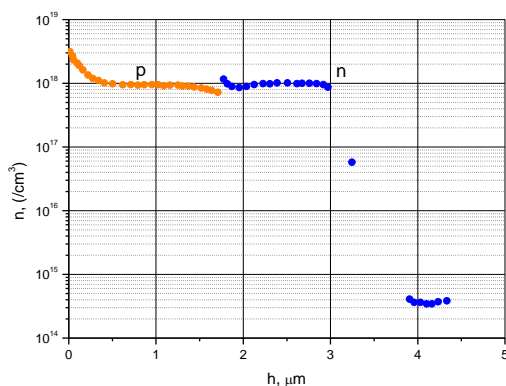


Рис. 2.14 – Профіль розподілу електронів і дірок в № 0919 кристалізованій на поверхні напівізолюючої підкладки підкладки GaAs.

На основі вище описаних результатів було побудовано залежність концентрації дірок у шарах твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,2$) від концентрації цинку у розчині-розплаві галію, рис. 2.15.

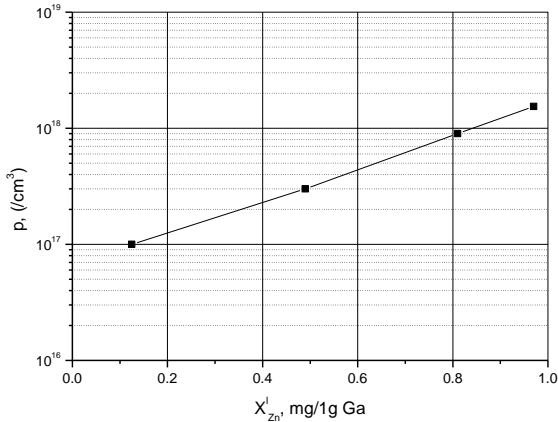


Рис. 2.15 – Залежність концентрації дірок у шарах твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,2$) від концентрації цинку у розчині-розплаві галію.

З використанням отриманих даних було кристалізовані епітаксійні гетероструктури GaAs\AlGaAs з градієнтним розподілом концентрації дірок в шарі твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Температурно-часовий режим кристалізації є ідентичний описаному вище.

На рис. 2.16 і 2.17 приведено профілі розподілу електронів і дірок в зразках № 0929 і № 0927 кристалізованих на поверхні легованих підкладок n- GaAs. Епітаксійні структури відрізнялись товщиною варізонного шару твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Як бачимо з рис.2.17 профіль розподілу дірок в шарі твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ має градієнтний характер, що забезпечить підвищення ККД фотоперетворювачів сонячної енергії виготовлених на основі таких структур.

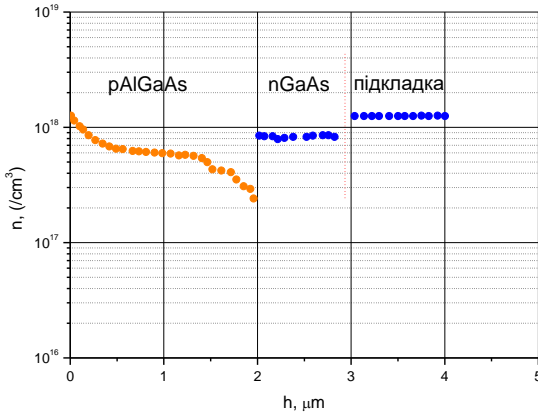


Рис. 2.16 – Профіль розподілу електронів і дірок в № 0929 кристалізований на поверхні легованої підкладки n- GaAs.

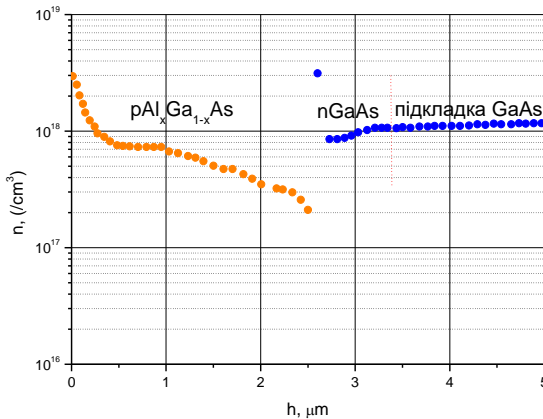


Рис. 2.17 – Профіль розподілу електронів і дірок в № 0927 кристалізований на поверхні легованої підкладки n- GaAs.

2.3.3. Відпрацювання базових фізико-хімічних аспектів формування властивостей гетеросистем AlGaAs / GaAs з нанорозмірними об'єктами

Морфологічна неоднорідність плівок є результатом різних швидкостей зародкоутворення та особливостей їх укрупнення на різних ділянках підкладки. Наслідком цих процесів є неодночасне

зарощування поверхні підкладки епітаксійним шаром і як результат – неоднорідність рельєфу його поверхні. Саме перша стадія нарощування епітаксійного шару, коли на поверхні підкладки утворюється зародок кристалізації і відбувається його розростання, є визначальною при формуванні морфології поверхні [64–67].

Початкові стадії формування епітаксійного шару в молекулярно-променевої, газофазній та низькотемпературній РФЕ є дуже схожі, оскільки розчинність елемента п'ятої групи в розплавах, а отже і швидкість кристалізації, є низькою (співмірною із швидкістю, що досягається у двох перших методах). Тому доцільно отримані нами результати впливу РЗЕ на морфологію епітаксійних шарів співставити із початковими процесами формування плівок – утворенням зародків кристалізації та формуванням квантових точок. Сукупний аналіз отриманих результатів дозволить більш точно спрогнозувати процеси кристалізації плівок, особливо на їх початкових стадіях, а значить з більшою вірогідністю змодельювати їх наступні стадії формування, аж до утворення макрорельєфу. Тим більше, що в низькотемпературній РФЕ існує для цього прекрасна технологічна можливість, зокрема розроблений і вперше апробований Марончуком І.Є. при отриманні квантових точок InAs в системі GaAs/InAs метод імпульсного охолодження насиченого розчину-розплаву (ІОНРР) [50–52,68]. На відміну від добре відомих методів молекулярно-променевої та газофазної епітаксії із металоорганічних сполук, ІОНРР не потребує дорогого та складного обладнання, а також має суттєву перевагу – забезпечує найбільш рівноважні, із усіх відомих методів, умови кристалізації епітаксійних шарів.

Враховуючи вище викладене, слід очікувати, що легування розплавів рідкісноземельними елементами в методі ІОНРР дозволить впливати на кінетику утворення квантових точок і тому більш точно оцінити процеси кристалізації епітаксійних плівок ще на перших стадіях їх формування.

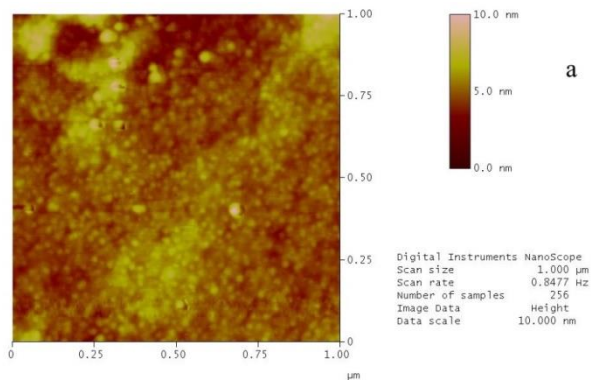
З цією метою нами були кристалізовані квантові точки InAs на поверхні епітаксійного шару GaAs. Вирощування квантових точок InAs здійснювали за методикою описаною у попередніх етапах роботи.

На підкладці n-GaAs(100) за температури 430 °С нарощували буферний шар n-GaAs із нелегованого галієвого розплаву. На поверхні цього шару нарощували шар квантових точок InAs. Завдяки незначній різниці в температурах теплопоглинача та підкладки імпульсне

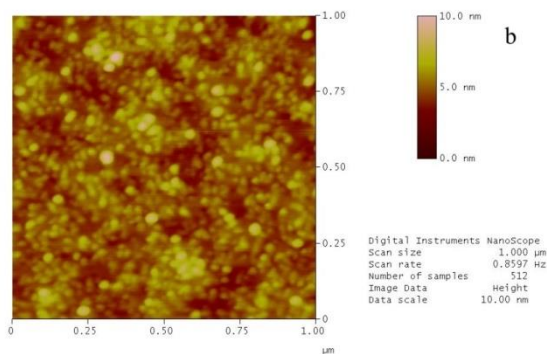
переохолодження приповерхневого із підкладкою шару розплаву не перевищувало 0,5 °С. Після нагрівання теплопоглинача до температури касети, розплав зливали з підкладки а реактор з касетою видаляли із термоблока. Температури T_1 і T_2 теплопоглинача та температуру нарощування вибирали на основі розрахунків процесу кристалізації квантових точок, приведених в [51]. Аналіз поверхні отриманих зразків здійснювали з використанням атомної силової мікроскопії (АСМ). На рис. 2.18 приведено типові фотографії поверхонь двох зразків, отриманих в ідентичних температурно-часових режимах із розплавів індію (рис.2.18a) та розплаву індію, легованого ітербієм (рис. 2.18b).

Як бачимо з рис. 2.18, квантові точки, отримані з розплаву легованого ітербієм, розміщені значно однорідніше, ніж ті, що отримані з індієвого розплаву. Розкид їх по висоті є також менший. Для того, щоб оцінити найбільш ймовірний механізм впливу ітербію на процес кристалізації, необхідно розглянути основні чинники, що визначають процес формування плівки. Процес зародкоутворення є надзвичайно чутливий до змін потенціального рельєфу поверхні підкладки (або шару), який в свою чергу визначається наявністю різного сорту дефектів, дислокацій, електрично активних центрів тощо. Саме ці місця на поверхні підкладки (центри кристалізації) є найбільш енергетично вигідні для закріплення на них адсорбованих атомів матеріалу, який кристалізується. Оскільки природа центрів кристалізації є різна, то величина потенційного бар'єру, який долатиме адсорбований атом при закріпленні на поверхні, є різною. Мірою величини цього бар'єру є енергія адсорбції атома.

В умовах термодинамічної рівноваги розчину-розплаву із підкладкою поверхневий моноатомний адсорбований шар складається із атомів розчинника (Ga чи In), атомів елемента п'ятої групи (As) і атомів спеціально введеної домішки (ітербій) та фонових домішок. Поки процес кристалізації не розпочався, атоми адсорбованого шару вільно дифундують по поверхні підкладки впродовж деякого часу τ_a . Рухливість атомів характеризується коефіцієнтом дифузії, який можна інтерпретувати як площу, що перекривається хаотичним броунівським рухом адсорбованого атома за одиницю часу. Якщо система розчинник-підкладка виводиться із термодинамічної рівноваги (шляхом зниження температури), то виникають сприятливі умови для початку кристалізації напівпровідникової сполуки.



QD-InAs (LPE)/GaAs, KT-10
dmytruk_qd_003



QD-InAs (LPE)/GaAs, KT-11
dmytruk_qd_004

Рис. 2.18 – Зображення квантових точок InAs на поверхні епітаксійного шару GaAs отримане атомним силовим мікроскопом:
а) зразок вирощений із насиченого розплаву In+InAs;
б) зразок вирощений із насиченого розплаву In+InAs+Yb(0,04 ат%).

При умові перекривання сфер взаємодії центру кристалізації на поверхні підкладки та адсорбованого атома, останній, закріплюється на підкладці утворюючи хімічний зв'язок із атомом підкладки. Утворюється зародок кристалізації. Інший адсорбований на поверхні атом стикаючись із ним приводить до його розростання по площі.

Атоми, які адсорбуються із об'єму розчину-розплаву, на поверхні зародка кристалізації, стимулюють його розростання вгору.

За відсутності ітербію розподіл адсорбованих на поверхні атомів арсену буде визначатись тільки розподілом центрів кристалізації. На початковій стадії формування плівки на ділянках підкладки із більшою густиною центрів кристалізації утворюється більша кількість квантових точок, котрі розростаються в окремі кластери. На ділянках, де густина центрів кристалізації є меншою, квантові точки добре розділяються одна від одної. Цю картину розподілу квантових точок ми можемо спостерігати на рис. 2.18а.

В присутності ітербію процес кристалізації може відбуватись за дещо іншим механізмом. Для того, щоб оцінити вплив рідкісноземельного елемента (ітербію) на процеси зародкоутворення епітаксійних шарів, нам потрібно визначити кількість атомів кожного із компонентів розчину-розплаву, що перебувають у моноатомному приповерхневому шарі. Кількість ітербію (0,04 ат%), що знаходилась у розплаві галію, вибирали виходячи з того, що за такого вмісту вже стають візуально помітними зміни у морфології плівок GaAs (InGaAs), а отже можна очікувати впливу таких кількостей ітербію і на мікрорівні – формування квантових точок. Згідно наших оцінок, концентрації ітербію 0,04 ат% в розплаві галію відповідає густина атомів ітербію в моноатомному шарі рівна $6,3 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$. Густина атомів арсену в моноатомному шарі розрахована, виходячи із кількості InAs, що може розчинитись в індієвому розплаві при температурі 430 °С, становить $4,0 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$. Густини атомів галію та індію в моноатомному шарі, якщо вони використовуються як розчинники, не залежно від температури кристалізації дорівнюють відповідно $1,6 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$ та $1,2 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. Оцінка густини острівців, що утворюються через 0,22 с після початку кристалізації, виконана за методикою [69–71], на основі самоузгодженої теоретичної моделі формування трьохвимірної плівки дає величину – $4,9 \cdot 10^9 \text{см}^{-2}$.

Час формування квантових точок в методі ІОНРР при мінімальних переохолодженнях (2–5 °С) на границі розділу підкладка-розплав, розрахований в [70], є того ж порядку (0,028–0,895 с). Тому, з великою ймовірністю можна прийняти густину центрів кристалізації на поверхні епітаксійного шару (підкладки) близькою до величини $4,9 \cdot 10^9 \text{см}^{-2}$. Оскільки, кількість атомів ітербію в моноатомному шарі та кількість центрів кристалізації на поверхні підкладки є співмірною, а

концентрація атомів арсену є близькою до концентрації атомів ітербію у розплаві, то процес формування квантових точок під впливом ітербію можна змоделювати таким чином. Атом ітербію, адсорбований поверхнею підкладки, або той, що знаходиться в моноатомному шарі біля поверхні, частково екрануватиме центр кристалізації, перешкоджаючи закріпленню на ньому дифундуючого по поверхні атома арсену. Оскільки, за час гомогенізації ітербій рівномірно розподіляється по об'єму розчину-розплаву, то на тих ділянках підкладки, де густина центрів кристалізації є вищою, ефект екранування виявлятиметься сильніше. Внаслідок чого обмежуватиметься доступ атомів арсену до вже кристалізованих квантових точок і призупинятиметься їх розростання та зливання в окремі кластери. Розподіл квантових точок по поверхні стає більш рівномірний, а кластероутворення майже відсутнє (рис. 2.18b).

Процеси, які відбуваються на мікрорівні, при зародкоутворенні та формуванні квантових точок під впливом ітербію, ще більш наочно виявляються і на макрорівні у вигляді зміни морфології поверхні півки. Спостерігаємо еволюцію поверхні шару від характерної для РФЕ у виді терас через виникнення особливого рельєфу “апельсинова шкірка” до утворення дефектів на поверхні у виді ямок різної форми – пірамід, зрізаних пірамід та паралелепіпедів. Один із можливих механізмів формування такого макрорельєфу полягає в тому, що ітербій, екрануючи частину центрів кристалізації, стимулює розростання острівців навколо інших центрів, ступінь екранування яких є меншим. Однорідність процесу масопереносу матеріалу до фронту кристалізації порушується, тому макрорельєф поверхні стає більш розвиненим. При низьких температурах кристалізації (430–600 °C) амплітуда розкиду горб-впадина є невеликою, оскільки, масопереніс (зумовлений розчинністю арсену чи фосфору в розплаві є незначний. Якщо шар кристалізується у великих температурних інтервалах $\Delta T > 50$ °C та при вищих температурах (700–900 °C), то вплив ітербію на морфологію виявляється значно сильнішим. Це зумовлено більш інтенсивним масопотоком компонента п'ятої групи, а при тривалому нарощуванні ще й збільшенням відношення кількості ітербію в розплаві до кількості елемента п'ятої групи. Оскільки, ітербій вбудовується в кристалічну ґратку АЗВ5 погано (в галійвмісних сполуках не більше $1 \cdot 10^{13}$ см⁻³) [70], то при тривалій кристалізації шару кількість атомів ітербію, що припадає на один атом елемента

п'ятої групи, зростатиме ще більше, порушуючи однорідність масопотоку цих елементів поблизу фронту кристалізації. Наслідком такого впливу є утворення дефектів типу пірамід, зрізаних пірамід, зрізаних паралелепіпедів і т.п.

Встановлено вплив ітербію на зародкоутворення в рідинофазній епітаксії галій та індій вмісних сполук AlGaIn , а також на формування квантових точок в системі GaAs/InAs , отриманих з використанням методу імпульсного охолодження насиченого розчину-розплаву. Показано, що основним чинником еволюції макрорельєфу поверхні епітаксійних шарів від характерного для РФЕ у виді терас через рельєф – „апельсинова шкірка” до утворення дефектів на поверхні у виді ямок різної форми, є екранування частини центрів кристалізації на поверхні підкладки атомами ітербію, які знаходяться в моноатомному шарі на фронті кристалізації. Отриманий результат важливий при виборі оптимальних концентрацій рідкісноземельних елементів у розплаві з точки зору досягнення не тільки низьких концентрацій та високих рухливостей електронів в епітаксійних шарах, але й якісної морфології поверхні, придатної для створення приладних структур з покращеними характеристиками.

2.3.4. Отримання варізонних гетероструктур n-AlGaAs-p-AlGaAs-p+AlGaAs з впровадженими нанорозмірними об'єктами

Розробка високоєфективних сонячних елементів, запланованих в цьому проєкті базується на двох підходах. Згідно першого, збільшення фотоактивного поглинання сонячного світла досягається завдяки використанню варізонного активного шару на основі твердих розчинів AlGaAs , які розширюють спектральний діапазон високоенергетичних фотонів, що поглинаються в базових областях SE . Другий – передбачає використання квантових точок InAs вбудованих в матрицю GaAs , які поглинають низько енергетичні фотони інфрачервоної ділянки сонячного спектру. Технології формування варізонних фотоелектричних структур із зростаючою до поверхні шириною забороненої зони та масивів квантових точок InAs на поверхні GaAs , описані вище.

Нижче буде викладений спосіб формування в єдиному технологічному процесі варізонних гетероструктур $\text{n-AlGaAs-p-AlGaAs-p+AlGaAs}$ з впровадженими нанорозмірними об'єктами

(квантовими точками InAs) призначених для виготовлення високоєфективних сонячних елементів.

Отримання варізонних гетероструктур n-AlGaAs-p-AlGaAs-p+-AlGaAs з впровадженими нанорозмірними об'єктами здійснюється в три стадії. На першій стадії на підкладці n-GaAs формуються квантові точки InAs із індієвого розчину-розплаву, пересиченого на 10-15°C, за температур 480-500°C впродовж 0,5с. На другій стадії за технологією рідиннофазної епітаксії в температурному інтервалі 850-700°C, кристалізується на підкладці n-GaAs, поверх квантових точок, буферний варізонний епітаксійний шар n-Al_xGa_{1-x}As із зростанням ширини забороненої зони в напрямку до поверхні шару шляхом додаванням в галієвий розчин-розплав вісмуту від 20 до 40 ат % та алюмінію в кількості від $7,0 \times 10^{-4}$ ат % до $2,0 \times 10^{-3}$ ат%, а на третій стадії утворюється р-n-перехід в цьому шарі, завдяки дифузії цинку із шару p-AlGaAs, який нарощується поверх шару твердого розчину n-AlGaAs.

Для кристалізації квантових точок не зв'язаних між собою спейсерним шаром вибраний низький температурний діапазон (480-500°C) оскільки, за таких температур розчинність арсену в індієвому розплаві є дуже низькою. Тому, при короткочасному контакті пересиченого по арсену на 10-15 °C індієвого розплаву, стає можливим створити однорідний масив квантових точок, який далі зарощується варізонним активним шаром n-Al_xGa_{1-x}As.

На Рис. 2.19 приведена фотографія квантових точок InAs отриманих на підкладці GaAs за температури 470°C із шару розчину-розплаву індію пересиченого по арсену на 15°C, який контактує із нею впродовж 0,5с. На Рис. 2.20 приведена фотографія квантових точок InAs отриманих на підкладці GaAs за температури 490°C із шару розчину-розплаву індію пересиченого по арсену на 12°C, який контактує із нею впродовж 0,5с.

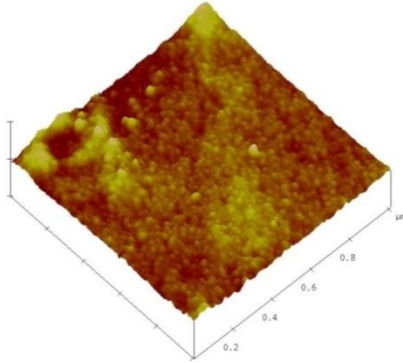


Рис. 2.19 – Фотографія квантових точок InAs отриманих на підкладці GaAs за температури 470°C із шару розчину-розплаву індію пересиченого по арсену на 15°C.

Формування масиву квантових точок InAs отриманих на підкладці GaAs здійснюється таким чином. В обмежений об'єм індієвого розчину-розплаву додається кількість арсену, що забезпечує його насичений стан за певного значення температури вибраної із діапазону 480-500°C. Перед подачею на підкладку GaAs (на якій відбувається ріст квантових точок) зазначений вище індієвий розчин-розплав приводиться в контакт із насичуючою арсенід індієвою підкладкою за температури насичення. Далі температура з будь-якою швидкістю підіймається на 10-15°C.

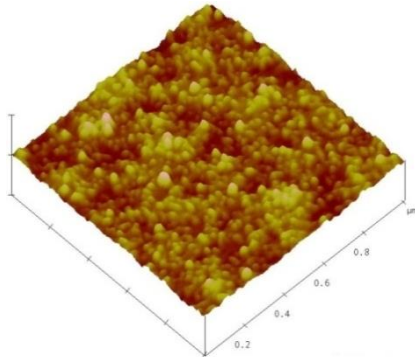


Рис. 2.20 – Фотографія квантових точок InAs отриманих на підкладці GaAs за температури 490°C із шару розчину-розплаву індію пересиченого по арсену на 12°C.

Оскільки, при цьому порушується тремодинамічна рівновага між підклакою і розплавом індію (розплав стає недонасиченим по арсену) то відбувається її відновлення шляхом підрозчинення насичуючої арсенід індієвої пікладки. Описана процедура забезпечує точне насичення розчину-розплаву на потрібну температуру. Після цього температура насиченого розплаву знижується до температури контакту, яка є на 10-15°C нижчою від температури підрозчинення насичуючої арсенід індієвої пікладки. Швидкість зниження визначається апаратними можливостями і може знаходитись в діапазоні 0,3-2,0 °C/хв. Кристалізація квантових точок на підкладці GaAs відбувається при короткочасному контакті, підготовленого згідно зазначеної вище процедури, пересиченого індієвого розчину-розплаву. Товщина розплаву становить 300,0 мкм, а час контакту дорівнює 0,5с і визначається апаратними можливостями. Згідно експериментальних даних визначено, що при товщині розчину-розплаву 300,0 мкм за температур нижчих від 520 °C і часі контакту 0,5с і менше утворюється масив квантових точок без змочуючого спейсерного арсенід індієвого шару. Як правило цей шар утворюється при контакті насиченого розчину-розплаву і підкладки, якщо параметри ґратки підкладки і напівпровідникової сполуки, що кристалізується із розплаву, відрізняються на 4% і більше. Оскільки суцільний спейсерний шар кристалізується першим на підкладці, а далі на ньому утворюється масив квантових точок, то його негативна роль зводиться до закорочування утворених квантових точок. В гетероструктурах для фотоелектричних перетворювачів завдяки цьому шару виникають генераційно-рекомбінаційні струми, які зменшують к.к.д сонячної комірки.

Після цього температура підклаки підіймається до вибраної в діапазоні 850-700°C температури, з максимально можливою швидкістю ($\approx 3-10$ °C/хв), що забезпечується апаратурою і стабілізується за цієї температури впродовж не менше 30 хв. На поверхню підкладки nGaAs, із вже сформованими квантовими точками InAs, подається галієвий розчин-розплав насичений по арсену на вибрану температуру. Галієвий розплав містить алюмінію в кількості $7,0 \times 10^{-4}$ ат % - $2,0 \times 10^{-3}$ ат%, На поверхню галієвого розчину-розплаву подається розплав вісмуту в кількості, що становить від 20 до 40 ат % від сумарної ваги розплаву. В результаті на поверхні підкладки кристалізується шар твердого розчину $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ із зростаючою до

поверхні кількістю алюмінію – «х». Дослідження параметрів квантових точок поводилось з використанням атомної силової мікроскопії. В таблиці 2.4 приведено результати дослідження по формуванню квантових точок InAs на поверхні підкладки GaAs із індієвого розчину-розплаву пересиченого на 12°C по арсену в залежності від температури контакту.

Таблиця 2.4 – Результати експериментів по формуванню квантових точок InAs на поверхні GaAs в залежності від температури контакту пересиченого на 12°C по арсену індієвого розчину-розплаву.

№ зразка	$T_{\text{конт}}$, °C	Середній діаметр КТ, D, nm	Концентрація КТ, $n (\times 10^{10} \text{ см}^{-2})$	Середня висота КТ, H, nm
0714-1	470	34	7,8	2,1
0715-1	480	41	5,2	3,6
0715-2	490	48	4,8	4,5
0722-1	500	57	2,4	5,3
0723-1	510	65	1,3	6,7
0803-2	520	73	0,8	7,1
0805-1	530	92	0,6	8,9

В таблиці 2.5 приведено результати дослідження по формуванню квантових точок InAs на поверхні підкладки GaAs за температури 500°C із індієвого розчину-розплаву в залежності від величини пересичення по арсену. Час контакту пересиченого індієвого розчину-розплаву із підкладкою GaAs в усіх експериментах був однаковим і становив 0,5 с.

Найбільш досконалі зразки з квантовими точками були отримані в температурному діапазоні 480-500 °C. При більш низьких температурах росту спостерігалось неповне видалення індієвого розчину-розплаву із поверхні підкладки. Частина поверхні займала мікро- та середні за розмірами краплинки індію. Із підвищенням температури росту спостерігається зменшення концентрації квантових точок і зростання їх розмірів (висоти та діаметру) аж до утворення окремих мікроділянок епітаксійної плівки.

Таблиця 2.5 – Результати експериментів по формуванню квантових точок InAs на поверхні GaAs в залежності від величини пересичення індієвого розчину-розплаву за температури контакту 500°C.

№ зразка	$T_{\text{перес}},$ °C	Середній діаметр КТ, D, nm	Концентрація КТ, $n (\times 10^{10} \text{ см}^{-2})$	Середня висота КТ, H, nm
0905-1	5	28	0,9	2,0
0905-1a	8	42	1,0	3,1
0905-2	10	51	1,9	4,0
0907-1	12	57	2,4	5,3
0914-1	15	63	4,2	6,0
0915-1	18	70	5,2	6,9

При низьких пересиченнях розчину-розплаву концентрація квантових точок та їх геометричні розміри є малою. Збільшення величини пересичення за постійної температури росту призводить до зростання концентрації, діаметру та висоти квантових точок. Якщо ж величина пересичення перевищує 15°C то діаметр і висота квантових точок істотно збільшуються і спостерігається утворення окремих кластерів – квантових точок зєднаних між собою.

Спостережувані зміни геометричних розмірів квантових точок InAs, сформованих на поверхні GaAs із індієвого розплаву, зумовлені декількома чинниками такими як температура, величина пересичення, час контакту.

Процес зародкоутворення є надзвичайно чутливий до змін потенціального рельєфу поверхні підкладки (або шару), який в свою чергу визначається наявністю різного сорту дефектів, дислокацій, електрично активних центрів тощо. Саме ці місця на поверхні підкладки (центри кристалізації) є найбільш енергетично вигідні для закріплення на них адсорбованих атомів матеріалу, який кристалізується. Оскільки природа центрів кристалізації є різна, то величина потенційного бар'єру, який долатиме адсорбований атом при закріпленні на поверхні, також відрізняється. Мірою величини цього бар'єру є енергія адсорбції атома.

В умовах термодинамічної рівноваги розчину-розплаву із підкладкою поверхневий моноатомний адсорбований шар складається із атомів розчинника (In) і атомів елемента п'ятої групи (As). Поки процес кристалізації не розпочався, атоми адсорбованого шару вільно

дифундують по поверхні підкладки впродовж деякого часу τ_a . Рухливість атомів характеризується коефіцієнтом дифузії, який можна інтерпретувати як площу, що перекривається хаотичним броунівським рухом адсорбованого атома за одиницю часу. Якщо система розчинник-підкладка виводиться із термодинамічної рівноваги (шляхом зниження температури, або ж подачі на підкладку пересиченого розчину-розплаву), то виникають сприятливі умови для початку кристалізації напівпровідникової сполуки. При умові перекривання сфер взаємодії центру кристалізації на поверхні підкладки та адсорбованого атома, останній, закріплюється на підкладці утворюючи хімічний зв'язок із атомом підкладки. Утворюється зародок кристалізації. Інший адсорбований на поверхні атом стикаючись із ним приводить до його розростання по площі. Атоми, які адсорбуються із об'єму розчину-розплаву, на поверхні зародка кристалізації, стимулюють його розростання вгору утворюючи квантову точку – об'єкт геометричні розміри якого не повинні перевищувати певні розміри (≈ 100 нм). Розподіл адсорбованих на поверхні атомів арсену буде в основному визначатись розподілом центрів кристалізації. На початковій стадії формування плівки на ділянках підкладки із більшою густиною центрів кристалізації утворюється більша кількість квантових точок, котрі розростаються в окремі кластери. На ділянках, де густина центрів кристалізації є меншою, квантові точки добре розділяються одна від одної. Іншим чинником, який визначає концентрацію квантових точок, за тієї ж температури росту, є величина пересичення розчину-розплаву. Чим більший ступінь пересичення розплаву тим вищою в ньому є кількість атомів арсену, а відповідно і зростає ймовірність їх закріплення на центрах з більшою енергією адсорбції атома. Тому, концентрація квантових точок, сформованих за низьких температур (470 °C) і більших пересичень є значно більшою (Рис. 2.19), ніж в зразку сформованому за вищих температур (490 °C) та менших пересичень індієвого розчину-розплаву (Рис. 2.20). Розміри ж квантових точок, навпаки, збільшуються при підвищенні температури кристалізації

Якщо, температура формування квантових точок є нижчою від 470 °C то спостерігається неповне видалення індієвого розчину-розплаву із поверхні підкладки. На частині розміщені мікро- та середні за розмірами краплинки індію. Із цих краплинок на окремих ділянках підкладки формуються окремі кластери квантових точок, або й острівці

суцільної плівки. Як це ми бачимо із рис. 1 у верхньому куті фотографії. За температур вище 500 °С квантові точки розростаються до великих розмірів з утворенням окремих конгломератів та мікроділянок епітаксійної плівки.

Якщо пересичення розчину-розплаву є меншим від 10°C то концентрація утворених квантових точок є невисокою, а однорідність по площі підкладки – невисокою, оскільки процес росту визначається в основному дефектами. При великих значеннях пересичення, більших від 15°C, концентрація квантових точок є високою, проте спостерігається утворення конгломератів, а також стає можливим виникнення процесу спонтанної кристалізації InAs в об'ємі розчину-розплаву – утворення другої фази.

Час контакту пересиченого індієвого розчину-розплаву із підкладкою GaAs становив 0,5с і визначався конструкцією графітової касети, яка використовувалась для формування варізонних шарів із впровадженими в них квантовими точками.

2.4. Виготовлення фотоелектричних перетворювачів на основі варізонних епітаксійних структур GaAs/AlGaAs

Нами був використаний наступний технологічний маршрут виготовлення фоточутливих сонячних комірок на основі варізонних гетероструктур p-AlGaAs / n-GaAs:

1. Кристалізація гетероструктур методом низькотемпературної рідиннофазної епітаксії (НТРЕ);
2. Нанесення просвітляючого покриття SiO₂ на епітаксійну структуру;
3. Нанесення фоторезисту на робочу та зворотню сторони структури;
4. Фотолітографія № 1 під контакти;
5. Відкриття вікон під контакти;
6. Нанесення багатошарової металізації Zn–Ni;
7. Нанесення багатошарової металізації Ni-Sn або, вакуумне напилення багатошарової металізації Au-Ge-Au;
8. Зняття фоторезисту з обох сторін структури;
9. Нанесення фоторезисту на робочу сторону структури;
10. Нанесення фоторезисту на обидва боки структури;
11. Фотолітографія № 2 під мезоструктури;
12. Травлення мезоструктур;
13. Впалювання контактів;

14. Розділення епітаксійних структур на окремі елементи-фотоперетворювачі.

2.4.1. Вибір матеріалу контактів та просвітляючого покриття до фотоелектричного перетворювача

Властивості контакту метал-напівпровідник визначаються такими механізмами:

- термоелектронною емісією носіїв струму над бар'єром;
- квантово-механічним тунелюванням носіїв через бар'єр;
- рекомбінацією в області просторового заряду і в нейтральній області.

Існує декілька основних способів отримання омичних контактів. Один із них полягає у створенні шару сильно легованого напівпровідника, котрий контактує з металом. У цьому випадку збіднена область є настільки вузькою, що навіть при наявності високого потенціального бар'єру переважає емісія під дією поля і контакт є омичним (квантово-механічне тунелювання носія через бар'єр). Цей підхід найбільш широко використовується на практиці.

Другий підхід полягає у створенні незначного потенціального бар'єру на границі розділу метал-напівпровідник. Проте, для сполук АЗВ5 він не залежить від матеріалу контакту а визначається енергетичними станами на поверхні. Тому, зменшення висоти бар'єру може бути досягнуте не вибором металу, а шляхом внесення домішок на поверхню напівпровідника з метою введення поверхневих станів для закріплення рівня Фермі.

Ще один із методів, котрий може бути використаний для формування омичного контакту полягає у введенні центрів рекомбінації поблизу границі розділу метал-напівпровідник (наприклад, з допомогою пошкодження або деформації поверхні напівпровідника). Якщо густина цих центрів буде достатньо високою, то основним механізмом, що визначає провідність буде рекомбінація в збідненій області, а це зумовить значне зменшення контактного опору. Проте дефект і напружена область можуть бути джерелом прихованих точкових дефектів, тому цей метод не є перспективним.

Для реалізації першого способу створення омичного контакту (найбільш поширеного) необхідно створити шар сильнолегованого напівпровідника безпосередньо на границі розділу метал-напівпровідник. З технологічної точки зору сильнолегований шар

формують або перед нанесенням металу (методами дифузії, іонної імплантації, епітаксії), або після його нанесення методом перекристалізації із розплаву (метод сплавлення), котрий найбільш широко використовується в технології виготовлення омічних контактів.

При створенні омічних контактів до GaAs використовують різні системи металізації [72]. В якості сплавних контактів найбільш часто використовують Au або Ag. Кращими вважаються композиції на основі Au тому що, срібло реагує із киснем і потребує захисту відразу ж після нанесення. В технології створення сплавних контактів до GaAs використовують германій у складі евтектичного сплаву Au–Ge (88 ваг.% Au + 12 ваг.% Ge), що має температуру плавлення 399°C. Одним із суттєвих недоліків цієї системи металізації є погана змочуваність поверхні GaAs. Для її покращення на поверхню Au–Ge напиляють шар Ni. Відомо не менше 10 різних варіантів контактної металізації типу: евтектичний сплав (Au–Ge) – метал (Ni, Pt, Ti, Ag, Zn). Загальна товщина металізації визначається способом формування рисунку топології і товщиною активного шару арсеніду галію. Для якісного проведення “вибухової” фотолітографії при формуванні рисунку металізованого покриття товщина останнього не повинна перевищувати ~ 0,3 мкм. З іншого боку товщина проплавлення шару арсеніду галію не повинна бути більшою від товщини поверхневого шару гетероструктури фотоперетворювача (~ 1,0 мкм). Для контактної системи Au–Ge/Ni–GaAs температура впалювання контактів становить (450–550) °C, а час впалювання 15–600 с. Не дивлячись на деякі недоліки, система металізації Au–Ge/Ni найбільш широко використовується при формуванні омічних контактів. Величина питомого контактного опору цієї системи становить – $(5 \cdot 10^{-4})$ Ом·см².

Формування металізації до гетероструктур у СЕ має свої особливості зумовлені перш за все зменшенням їх вартості. З огляду на це найбільш придатними для створення омічних контактів до GaAs є системи Ni–Sn – GaAs, для утворення омічного контакту до шарів n-типу і Ni–Zn – GaAs, до шарів p-типу. Найбільш дешевим та простим в технологічному виконанні є спосіб електрохімічного осадження. Величина питомого контактного опору контактів Ni–Zn – GaAs, Ni–Sn – GaAs знаходиться в межах $(1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4})$ Ом·см², що співмірно із величиною питомого контактного опору системи Au–Ge/ Ni – $(5 \cdot 10^{-4})$ Ом·см². Тому для виготовлення металізації до фотоелектричних

перетворювачів на основі гетероструктур були вибрані системи Ni-Zn – GaAs, Ni-Sn – GaAs.

Правильний вибір матеріалу просвітлюючого покриття дозволяє підняти коефіцієнт корисної дії сонячної батареї на 10-20%. Аналіз літературних даних [59,72] показав, що для фотоперетворювачів на основі гетероструктур GaAs–AlGaAs використовують покриття типу SiO₂, Si₃N₄, ZnSe–MgF₂, TiO_x–MgF₂, Sb₂O₃. Нами було вибрано просвітлююче покриття на основі SiO₂ котре наноситься електроннопроменевим розпиленням. Цей спосіб забезпечує одержання безпористих плівок, є високопродуктивним і добре відтворюється.

2.4.2. Відпрацювання технологічного режиму нанесення металізованого покриття на фотоелементи

Обов'язковою технологічною операцією перед нанесення контактів на напівпровідникові структури є хімічна обробка їх поверхні. Правильний вибір травника для хіміобробки поверхні структур в значній мірі визначає якість контакту. Якщо критерієм якості контакту вибирати величину потенціального бар'єру метал–напівпровідник, то згідно даних [73,74] приведених в таблиці 2.6, найнижча висота потенціального бар'єру досягається при використанні травника MeOH:H₃PO₄:H₂O₂. Враховуючи те, що ця різниця є невелика для приведених травників як правило найбільш часто використовують травники на основі сірчаної кислоти, котрі є значно безпечнішими у роботі і приготуванні.

Таблиця 2.6 – Параметри бар'єру Pt/n-GaAs в залежності від попередньої обробки пластин

Травник	Висота потенційого бар'єру, eV
H ₂ SO ₄ :H ₂ O:H ₂ O ₂	1,07
MeOH:H ₃ PO ₄ :H ₂ O ₂	1,06
Br ₂ :MeOH	1,09

Для попередньої обробки епітаксійних структур був використаний травник H₂SO₄:H₂O:H₂O₂ = 18:1:1, котрий має швидкість травлення в межах 0,2 мкм/хв. Низькі швидкості травлення забезпечують прецизійне підтравлення поверхневого контактного шару враховуючи, що його товщина становить 1,0–1,2 мкм.

Як відомо [73,75], одним із найбільш оптимальних шляхів створення омичного невідпрямляючого контакту до напівпровідника є зменшення висоти потенціального бар'єру метал-напівпровідник. Проте, для GaAs неможливо підібрати метал, котрий дає бар'єр малої висоти, тому для створення контактних систем необхідно використовувати як мінімум ще один метал. Ведення цього проміжного шару металу забезпечує зниження висоти потенціального бар'єру, або ж підвищує рівень легування приповерхневого шару напівпровідника [76,77]. На практиці обидві можливості часто реалізуються одночасно.

Для створення омичних контактів до шару p-AlGaAs варізонних гетероструктур p-AlGaAs / n-GaAs було використане електрохімічне осадження контактного шару (88%) Zn–Ni з електроліту:

-окис цинку ZnO	15 г/л
-NiCl ₂ ·6H ₂ O	12-36 г/л
-NH ₄ Cl	250 г/л
-H ₃ BO ₃	20г/л.

Осадження проводили на епітаксійну структуру за температури 40⁰С. Густина струму через електроліт становила $j_a=0,1-0,5$ А/дм². Електроліт перемішували механічно. Осадження проводили на протязі 90–120 с. Такий режим осадження забезпечував створення металізованого покриття з товщинами 0,8–1,4 мкм.

Для створення омичних контактів до зворотнього боку тандемної гетероструктури був використаний сплав Ni-Sn (65%) отриманий електрохімічним осадженням із електроліту:

-хлористий нікель NiCl ₂ ·6H ₂ O	250-300 г/л
-хлористе олово SnCl ₂ ·2H ₂ O	45-50 г/л
-фтористий натрій Na F	30 г/л.

Осадження проводили за температури 45-55 ⁰С. Густина струму через електроліт становила $j_a=0,1-0,5$ А/дм². Електроліт перемішували механічно. Осадження проводили на протязі 90–120 с, рН електроліту становив 4,5–5. Такий режим осадження забезпечував створення металізованого покриття товщиною 0,8–1,4 мкм.

Крім контактної системи Ni-Sn до n-GaAs нами були відпрацьовані режими нанесення багатозарової металізації на основі Au-Ge-Au з використанням вакуумного магнетронного розпилення мішеней золота та германію.

Для забезпечення низьких значень питомого контактного опору та омичності контактів після нанесення багатошарової металізації Au-Zn-Au та Au-Ge-Au проводиться її сплавлення в атмосфері очищеного водню. Важливим є вибір оптимального температурно-часового режиму при котрому металізоване покриття не дифундує в глибину епітаксійної структури і зберігає хорошу адгезію, а контактний опір є найнижчим. Найбільш критичною є система металізації Au-Ge-Au, що зумовлено великими коефіцієнтами дифузії германію. Нами були апробовані декілька режимів сплавлення металізації Au-Ge-Au (рис. 2.21).

Сплавлення контактів проводили за методикою [78]. Електропіч виводили на задану температуру. Кварцевий реактор із контролюючою термопарою, в котрому знаходились зразки, вводився у електропіч. Температура в середині реактора вимірювали контрольною термопарою. Процес сплавлення проводили в атмосфері очищеного водню (точка роси $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Як бачимо із рис. 2.21, час та максимальна температура сплавлення залежать тільки від початкової температури електропечі.

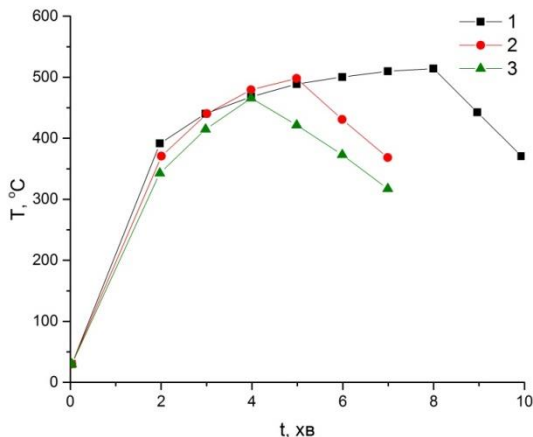


Рис. 2.21 – Температурно-часовий режим сплавлення багатошарової металізації Au-Ge-Au. Температура електропечі перед введенням реактора із зразками – 564 (1); 576 (2); 579 (3) $^{\circ}\text{C}$.

Дослідження показали, що зразки із багатшаровою металізацією Au-Ge-Au сплавлені по режиму 1 характеризувались найменшим значенням величини питомого контактного опору $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см⁻³. Вимірювання проводили на тестових зразках згідно методики викладеної в [78]. Крім того, вимірювання профілю металізованих доріжок на поверхні гетероструктури до та після сплавлення контактів показало, що після сплавлення контактів по режиму 2 (рис. 2.21) товщина металізованої доріжки Au-Ge-Au зменшується на третину. Тобто відбувається сплавлення Au-Ge-Au з контактним шаром гетероструктури.

Порівняння профілограм металізованих доріжок Au-Ge-Au сплавлених по режимах 1 і 2 (рис. 2.21) показав, що сплавлення по режиму 1 приводить до майже повної дифузії компонентів металізації в глибину контактного шару та одночасній рекристалізації його поверхні. Тому, цей режим сплавлення не є придатним для створення омичних контактів.

2.4.3. Оптимізація технології нанесення просвітляючого покриття

При виборі типу просвітляючого покриття та технології його нанесення слід врахувати той факт, що SE на основі гетероструктур GaAs/AlGaAs планується експлуатувати в різних погодних умовах, що передбачає їх захист від дії зовнішніх чинників. З цією метою на поверхню SE як правило за допомогою клейових з'єднань наноситься захисний скляний або полімерний шар. Це висуває додаткові вимоги до просвітляючого шару. Він повинен мати якнайменшу кількість пор, бути механічно міцним та хімічностійким. Відомо, що діелектричні плівки SiO₂ нанесені електронно-променевим розпиленням характеризуються найменшою кількістю дефектів (проколів) хоч і мають значний вбудований заряд, котрий може негативно впливати на ККД SE, особливо із мілкозалагаючим p-n переходом. З метою зменшення величини вбудованого заряду нами був відкоректований технологічний процес електронно-променевого нанесення шарів SiO₂. Це коректування полягало у виборі оптимальної температури підкладки та швидкостей розпилення SiO₂ із твердої мішені. В результаті були отримані шари SiO₂ товщиною 0,35–0,65 мкм з кількістю проколів – 0,5–1,0 см⁻², а найменша густина вбудованого заряду на границі SiO₂ – SE GaAs-AlGaAs-InGaAs становила 10¹⁰ см⁻².

2.4.4. Спектральна чутливість і вольт-амперна характеристика фотоелектричного перетворювача

Для визначення перспективності використання того або іншого матеріалу, як основи для створення СЕ, перш за все, необхідне визначити спектральну залежність фотоелектричних параметрів матеріалу, зокрема, квантового виходу внутрішнього фотоефекту η , коефіцієнта оптичного поглинання α , і порівняти одержані спектри із спектром потужності $E(\lambda)$ сонячного випромінювання (рис. 4.2). Оскільки, характер функції $E(\lambda)$ істотно залежить від умов вимірювання (рівень інтенсивності потоку сонячного випромінювання в навколосемному космічному просторі прийнято позначати як АМ0, на екваторі — АМ1, в середніх широтах при висоті сонця $41^\circ 49'$ – АМ1,5, при висоті Сонця 30° – АМ2, і т.д.) то вимоги до матеріалу залежать від умов роботи проектованого СЕ. Проте, практика показує, що вдалий вибір того або іншого матеріалу для створення СЕ, ще не гарантує високих характеристик всього пристрою. Не менш важливу роль відіграє досконалість технології виготовлення приладу в цілому. Для кількісної оцінки ефективності конструкції СЕ зручно користуватися еквівалентною електричною схемою його параметрів. При розробці методики дослідження характеристик СЕ, параметри еквівалентної схеми оцінювали за результатами дослідження спектральної чутливості фотоелектричних перетворювачів виготовлених на основі першого каскадного р-п переходу GaAs/AlGaAs та його вольт-амперних характеристик в темноті і при освітленні.

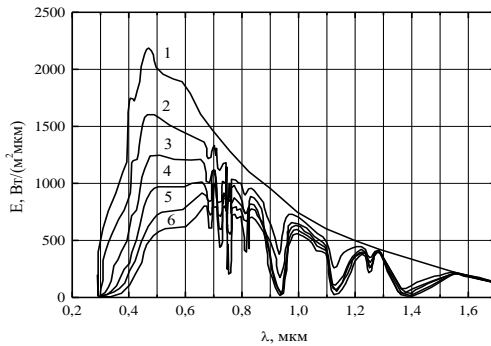


Рис. 2.22 – Спектральний розподіл енергії сонячного випромінювання при різних значеннях атмосферної маси: 1 – АМ0, 2– АМ1, 3 – АМ2, 4 – АМ3, 5 – АМ4 і 6 – АМ5.

Спектральна чутливість СЕ визначається як спектральна залежність струму його короткого замикання $I_{кз}$, розрахованого на одиницю енергії падаючого оптичного випромінювання. Схема установки для вимірювання спектральній чутливості СЕ приведена на рис. 2.33, фотографія лабораторного стенду показана на рис. 2.24.

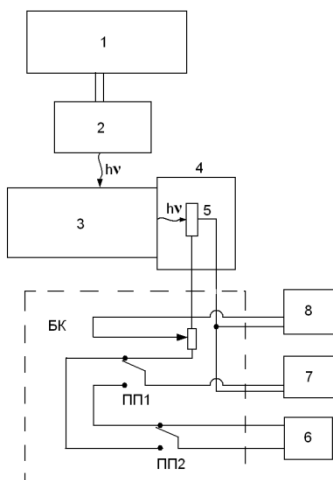


Рис. 2.23 – Блок-схема установки для вимірювання спектральної чутливості СЕ, а також світлової і темної вольтамперних характеристик приладу:

- 1 – блок живлення лампи;
- 2 – лампа розжарювання КГ 150 – 24;
- 3 – монохроматор МДР-23;
- 4 – камера для досліджуваного СЕ;
- 5 – досліджуваний зразок СЕ;
- 6 – джерело живлення типу П4105;
- 7 – магазин опорів;
- 8 – вольтметр В7 – 21А;
- БК – блок комутації;
- ПП1 – тумблер для підключення у вимірювальне коло зовнішнього джерела живлення 6;
- ПП2 – тумблер для зміни напруги полярності зовнішнього джерела живлення 6.

Оптична частина установки складається з джерела світла (2), і монохроматора (3). У якості джерела світла використовується галогенна лампа розжарювання типу КГ 150-24, а як монохроматора – оптична частина монохроматора МДР-23. Установка забезпечена також блоком живлення джерела світла (1), і камерою (4) в яку поміщається досліджуваний зразок (5). Всі вимірювання проводили за кімнатної температури. Електрична частина вимірювальної схеми включає джерело живлення вимірювального кола (6), навантажувальний змінний резистор (7), вольтметр (8) і амперметр. У якості джерела живлення вимірювального кола використовується джерело постійного струму П4105, для вимірювання напруги

застосовується цифровий вольтметр В7-21А, а для вимірювання струму – цифровий вольтметр В7-21А з відповідною приставкою.

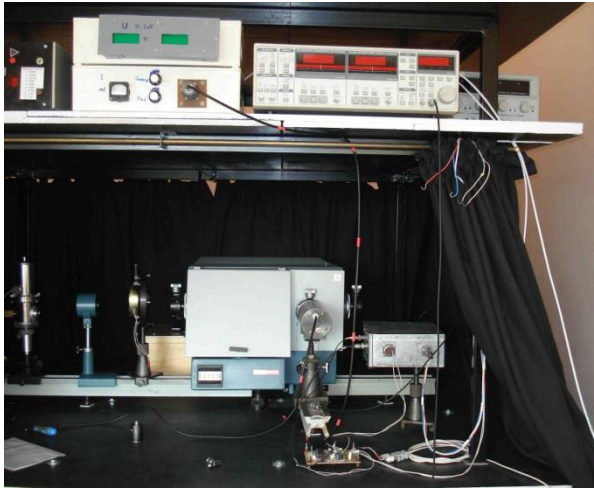


Рис. 2.24 – Фотографія лабораторного стенду для вимірювання фотоелектричних параметрів гетероструктур GaAs/AlGaAs.

Елементи, обведені на рис. 2.23 пунктирним прямокутником розташовані в блоці комутації (БК). Крім змінного резистора в БК входять також перемикач ПП1, що дозволяє проводити вимірювання як при підключеному блоці живлення вимірювального кола б, так і без його підключення. Перемикач ПП2 забезпечує можливість зміни полярності напруги, що видається блоком живлення б. Вимірювання спектральної чутливості СЕ здійснюється при відключеному джерелі живлення б, що досягається переведенням ПП1 в нижнє положення.

Після установки номінального режиму для джерела світла на шкалі довжин хвиль монохроматора слід встановити довжину хвилі 650 нм і повністю відкрити щілину монохроматора. Потім потрібно розташувати досліджуваній зразок у вимірювальній камері установки таким чином, щоб світловий пучок, що виходить з монохроматора, повністю освітлював робочу поверхню досліджуваного зразка. Далі, встановлюється початкове значення довжини хвилі λ_0 спектру і вимірюється величина $I_{\text{кз}}(\lambda_0)$ при нульовому опорі навантажувального резистора, і максимальному значенні ширини щілини монохроматора. Після цього, залишаючи щілину повністю відкритою, встановлюється

нове значення довжини хвилі на шкалі монохроматора і знову проводиться вимірювання струму короткого замикання. Для зручності подальшого оброблення результатів вимірювання рекомендується зміни довжини хвилі випромінювання здійснювати з постійним кроком λ_1 . Для розрахунку спектральної чутливості ФЕП отримані значення $I_{K3}(\lambda)$ розділяли на число фотонів $N(\lambda)$, при якому отримано вимірне значення струму короткого замикання. Чисельні значення параметрів λ_0, λ_1 приймали рівними 500 нм і 10 нм відповідно.

2.5. Вимірювання основних параметрів фотоелектричних перетворювачів

2.5.1 Методика дослідження *CE AlGaAs / GaAs*

З метою уніфікування вимірювань параметрів фотоелектричних перетворювачів, одержання світлових вольт-амперних характеристик проводили підтримуючи густину світлового потоку $\Phi_0=1000$ Вт/м² та температуру $T = 25^\circ\text{C}$, тобто забезпечуючи стандартні умови вимірювання кожного досліджуваного зразка. ВАХ фотоелектричних перетворювачів вимірювали з допомогою аналізатора напівпровідникових параметрів HP 4145A. В якості джерела світла було використано імітатор сонячного випромінювання SF-150-C, що забезпечував $\Phi_0=1000$ Вт/м² (АМ 1,5).

Деякі зразки фотоелектричних перетворювачів було досліджено з використанням проградуйованого контрольного фотоелемента з аналогічною спектральною характеристикою що й досліджуваний фотоперетворювач в емітованому сонячному випромінюванні згідно ДСТУ ІЕС 60904-7:2008, де в якості джерела світла було використано галогенну лампу (рис. 2.25). Контрольний сонячний елемент було використано для встановлення густини світлового потоку АМ 1,5. Тобто, освітлення робочої площини з фотоперетворювачами підбирали так, що контрольний фотоелемент генерував необхідне значення струму короткого замикання. Фотоактивна поверхня контрольного та тестового перетворювачів була компланарна в межах $\pm 5^\circ$, а нормаль опущена на фотоактивну поверхню була паралельною центральній лінії світлового пучка в межах $\pm 5^\circ$.

Температура досліджуваного і контрольного перетворювачів не відрізнялися більше ніж $\pm 0,5$ К. Струм і напругу виміряли з точністю $\pm 0,5\%$ з використанням незалежних провідників від виходу фотопертворювачів (рис. 2.25, 4, 5). Було використано регульоване

електронне навантаження М8872 (рис. 2.25. б) для компенсації спаду напруги на зовнішньому, послідовно увімкненому магазині опорів. Струм фотоперетворювача визначали шляхом вимірювання спаду напруги на прецизійному опорі, номінал якого було вибрано так, що спад напруги на ньому не перевищував 3% напруги холостого ходу.

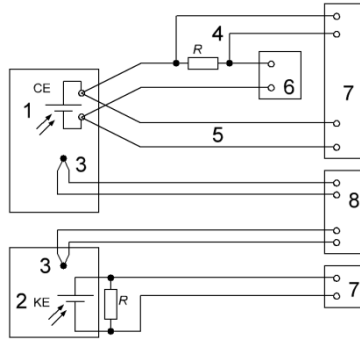


Рис. 2.25 – Схема вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів. 1, 2 – фотоперетворювачі; 3 – термопати К типу; 4, 5 – незалежні провідники; 6 – регульоване електронне навантаження М8872; 7 – мілівольтметри; 8 – цифровий індикатор температури.

Коефіцієнт корисної дії фотоперетворювачів – відношення максимальної вихідної потужності P_M до потужності падаючого світлового потоку P_0 :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} = \frac{J_M U_M}{P_0} = \frac{ff J_{sc} U_{oc}}{P_0} \quad (0.28)$$

тут J_M U_M густина струму і напруга фотоперетворювача, що відповідають точці максимальної потужності P_M , ff – фактор заповнення, J_{sc} – густина струму короткого замикання, U_{oc} – напруга холостого ходу. Фактор заповнення розраховували за формулою

$$ff = \frac{J_M U_M}{J_{sc} U_{oc}} = \frac{20,37 \cdot 0,44}{24,5 \cdot 0,54} = 0,677 \quad (0.29)$$

На рис. 2.26. приведено вольт-амперні характеристики двох фотоелементів на основі гетероструктур AlGaAs / GaAs. Перша крива

виміряна на СЕ з варізонним шаром $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в котрому « x » змінюється по товщині шару від 0 до 0,3 на поверхні (детальний розподіл « x » приведений на рис. 2.10). Друга крива - виміряна на фотоелектричному перетворювачі в котрому шар твердого розчину $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ має постійне значення $x = 0,32$ по всій товщині шару.

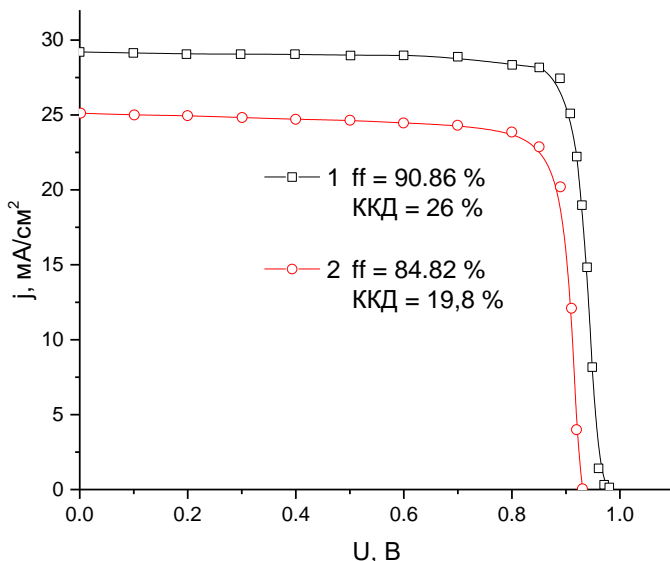


Рис. 2.26 – Вольт-амперні характеристики фотоелектричних перетворювачів на основі гетероструктур $\text{AlGaAs} / \text{GaAs}$

Як бачимо з рис. 2.26 виміряні значення напруги холостого ходу $U_{\text{хх}}$ та густини струму короткого замикання $J_{\text{к.з.}}$ при світловому потоці, що відповідає атмосферним умовам АМ 1,5 ($100 \text{ мВт}/\text{см}^2$), становлять 0,98 В і $29.2 \text{ мА}/\text{см}^2$ (крива 1) та 0,93 В і $25.1 \text{ мА}/\text{см}^2$ (крива 2) відповідно. Таким чином, з отриманих результатів бачимо, що фотоелектричний перетворювач з одним $p\text{-n}$ переходом $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ та постійним по всій товщині шару значенням « x » має менші значення ККД (19,8 %) ніж фотоперетворювач з варізонним активним шаром $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в котрому склад твердого розчину « x » змінюється по товщині шару від 0 на границі розділу $n\text{-GaAs}/p\text{-AlGaAs}$ до 0,3 на поверхні варізонного шару $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($\text{ККД} = 26\%$) Розроблена технологія формування варізонних шарів з одним робочим

p-n переходом забезпечує отримання СЕ із високим значенням ККД, що є порівняльним із значеннями [79,80] характерними для тандемних СЕ з двома робочими p-n переходами.

Сонячні елементи на основі варізонної епітаксійної структури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / GaAs із квантовими точками InAs у варізонному шарі n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ продемонструвала найбільше значення коефіцієнта корисної дії (ККД 28,4%), що є значною величиною для сонячних комірок на основі арсеніду галію із одним p-n переходом.

На рис. 2.27 приведено ВАХ в умовах освітлення АМ 1,5 варізонної епітаксійної структура $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / GaAs із впровадженими квантовими точками InAs у варізонний шар n $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

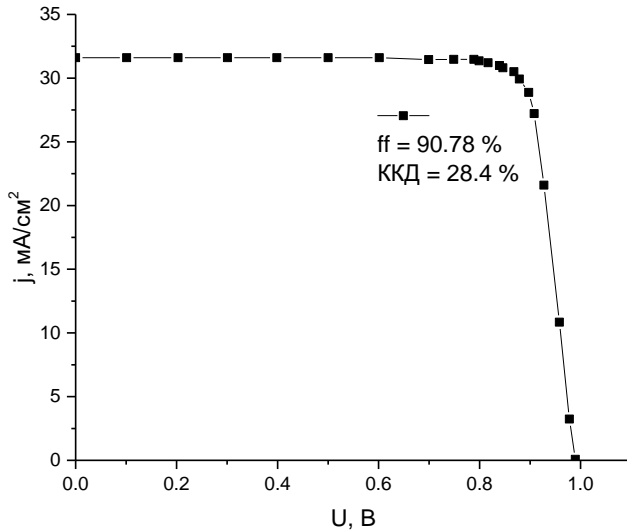


Рис. 2.27 – Вольт-амперна характеристика в умовах освітлення (АМ1,5) варізонної епітаксійної структура $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / GaAs із впровадженими квантовими точки InAs у варізонний шар n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Проаналізуємо наші технологічні результати досягнуті у цьому проєкті при виготовленні сонячних комірок на основі арсеніду галію та його твердих розчинів. Відштовхуючись від розробленої технології вирішено задачу виготовлення епітаксійної структури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / GaAs з одним p-n переходом і активним шаром твердого розчину

$\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$ постійного складу, досягнути істотного підвищення ККД сонячної комірки застосувавши у якості фоточутливого шару варізонний твердий розчин $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ширина забороненої зони якого зростає до поверхні структури. Крім того, додаткове підвищення значення ККД планувалось досягнути формуванням масиву не зв'язаних між собою квантових точок InAs впроваджених у варізонний шар твердого розчину $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

На рис 2.26. приведені ВАХ двох сонячних комірок виготовлених на основі епітаксійної структури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{GaAs}$ із одним р-п переходом та шаром твердого розчину $\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$ постійного складу (крива 2), а також епітаксійної структури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{GaAs}$ з одним р-п переходом та варізонним шаром твердого розчину $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (крива 1) в котрому начення «х» по товщині змінюється від 0,1 до 0,32 (як це проілюстровано на рис.3.1). Значення «х» у $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ не перевищували більше ніж 0,35, оскільки вище цього значення твердий розчин стає непрямозонним, а отже в ньому істотно погіршується умови фотогенерації носіїв заряду. Порівняння ККД показує, що сонячні комірки виготовлені на основі варізонної епітаксійної структури, досягають значення 26% при $\text{AM}1,5$. Тоді, як значення ККД досягнуте сонячними комірками з одним р-п переходом та шаром твердого розчину $\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$ постійного складу не перевищує 19,8%. Формування квантових точок InAs у варізонному активному шарі $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ епітаксійної структури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{GaAs}$ з одним р-п переходом підвищують ККД сонячного елемента до 28,4% у порівнянні із значенням, що досягається фотоелектричним перетворювачем тільки із варізонним активним шаром. Це значення є співмірним із тим, що досягається промисловими тандемними фотоелектричними перетворювачами CaAs/InGaP виготовленими методом МОС-гідридної епітаксії.

Істотне зростання ККД в сонячних комірках на основі варізонної епітаксійної структури було досягнуто завдяки таким двом основним чинникам. Перший – збільшено фотоактивне поглинання сонячного світла варізонним активним шаром $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ширина забороненої зони якого зростає до поверхні завдяки розширенню фоточутливості сонячної комірки у короткохвильовій області сонячного спектру. Крім того, шляхом вибору відповідного координатного профілю ширини забороненої в області біля р-п переходу досягнуто зменшення величини темного струму. По-друге,

підвищити ККД вдалося завдяки зменшенню рекомбінаційних втрат фотоносіїв. Основну роль тут відіграло вбудоване електричне поле, зумовлене зменшенням ширини забороненої зони від освітленої поверхні в глибину активного шару. Істотно вдалось підвищити дифузійно-дрейфову довжину неосновних носіїв заряду до значень, що перевищує товщину базової області, а отже майже всі генеровані світлом носії досягають області об'ємного заряду р-n-переходу, тобто усуваються рекомбінаційні втрати в базовій області. Цього вдалося досягнути через додаткову очистку матеріалу активної області від фонових домішок завдяки застосуванню рідкісноземельних елементів (ітербій та гадоліній) в якості спеціально введених у розчин-розплав гетеруючих домішок. Введення ж масиву нанорозмірних об'єктів (не зв'язаних між собою квантових точок InAs) у варізонний активний шар $Al_xGa_{1-x}As$ сонячного елемента забезпечило розширення його робочого діапазону у довгохвильову область спектру. Таким чином, розроблений нами технологічний метод формування епітаксійних структур $Al_xGa_{1-x}As$ / GaAs методом рідиннофазної епітаксії з активним варізонним шаром твердого розчину n- $Al_xGa_{1-x}As$ в котрий, впроваджений масив квантових точок InAs забезпечив істотне підвищення фотоперетворювачів сонячного світла з одним р-n переходом (більш ніж на 8%).

2.5.2. Методика досліджень сонячних модулів

На даний час на базі Хмельницького національного університету функціонує дахова сонячна електростанція (рис. 2.28).



Рис. 2.28. Сонячні панелі на даху корпусу №4 ХНУ

В лабораторних умовах проводяться дослідження фотоелектричних сонячних модулів при різних рівнях освітленості та температури (рис. 2.29, 2.30.).



Рис. 2.29. Установа для досліджень характеристик сонячних панелей

Установа побудована на основі матриці освітлювальних елементів з різними характеристиками спектру та потужності світлового потоку. Передбачена можливість моделювання нерівномірної освітленості сонячного модуля.



Рис. 2.30. Дослідження характеристик сонячної панелі у лабораторії сонячної енергетики ХНУ.

В процесі досліджень проведено вимірювання вольт-амперних характеристик ФМ при рівномірній та нерівномірній освітленості. Досліджено ефективність різних типів імпульсних перетворювачів при нерівномірній освітленості сонячної батареї.

Отримані результати досліджень фотоелектричних модулів використані для побудови імітаційних моделей у програмному середовищі Simulink, з метою покращення характеристик імпульсних перетворювачів енергії.

На рис. 2.31 зображено імітаційну модель, побудовану за вимірними характеристиками сонячної батареї, яка зображена на рис. 2.29, 2.30.

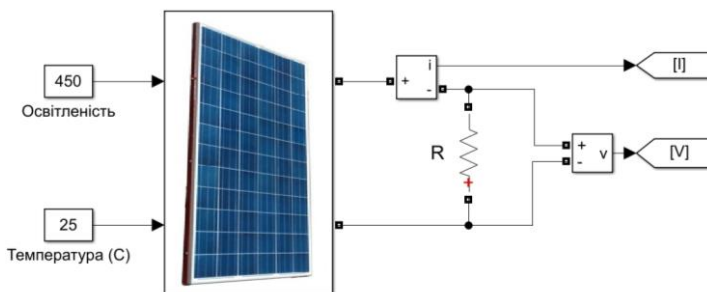


Рис. 2.31. Імітаційна модель досліджуваної сонячної панелі в Simulink

Характеристики отриманої моделі зображені на рис. 2.32.

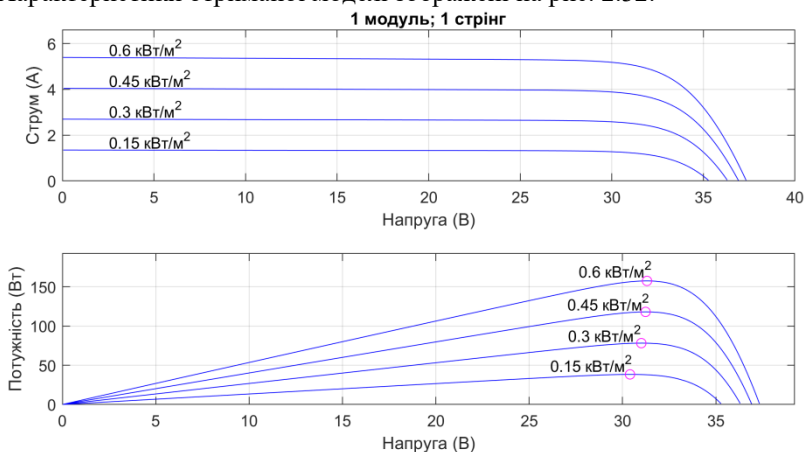


Рис. 2.32. Характеристики імітаційної моделі сонячної панелі

3. ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Підвищуючий імпульсний перетворювач

У роботі [8] наведено велику кількість схем підвищення постійної напруги за допомогою елементів L , C та перемикачів. При цьому однією із найпростіших для практичної реалізації є схема, яка наведена на рис. 3.1 [36].

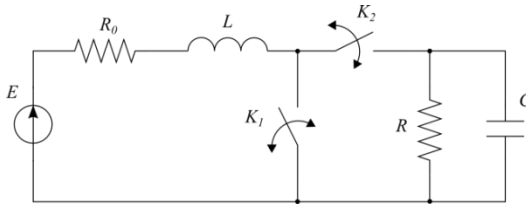


Рис. 3.1. Схема підвищуючого імпульсного перетворювача

Аналогічні результати дає і схема, яка наведена на рис. 3.2.

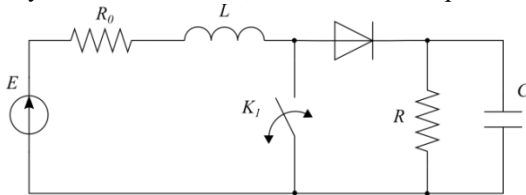


Рис. 3.2. Еквівалентна схема підвищуючого імпульсного перетворювача

Для аналізу та опису більш зручною є зручніше схема рис. 3.1, яка далі розглядається.

Фаза 1. K_2 - розімкнутий, а K_1 замкнутий.

Початкові умови: $i_L(0) = 0$; $U_C(0) = 0$.

Струм в котушці індуктивності описується виразом

$$i_L = \frac{E}{R_0} + (i_L(0) - \frac{E}{R_0})e^{-\frac{R_0}{L}t} \quad (0.30)$$

де R_0 - включає внутрішній опір джерела напруги, опір котушки індуктивності та опір ключа K_1 . Струм в опорі R_H відсутній ($U_C / 0 = 0$) [36].

У фазі 2 через час $t = t_1$ ключ K_2 замикається, а ключ K_1 розмикається. Тепер розрахункова схема має вигляд рис. 3.3

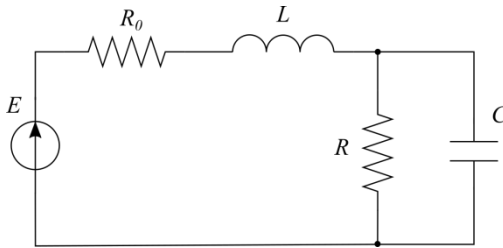


Рис. 3.3. Еквівалентна схема заміщення для фази 2

Диференційне рівняння кола для фази 2 має другий порядок, а відповідне йому характеристичне рівняння описується виразом:

$$R_H LC p^2 + (R_0 R_H C + L)p + R_0 + R_H = 0 \quad (0.31)$$

Корені характеристичного рівняння:

$$p_{1,2} = -\frac{R_0 R_H C + L}{2R_H LC} \pm \sqrt{\left(\frac{R_0 R_H C + L}{2R_H LC}\right)^2 - \frac{R_0 + R_H}{R_H LC}}. \quad (0.32)$$

Відомо, що в RLC -колі (рис. 3.3) напруга на конденсаторі може перевищувати напругу джерела, якщо перехідний процес має коливальний характер. В даному випадку такий перехідний процес має місце при умові

$$\frac{R_0 + R_H}{R_H LC} > \left(\frac{R_0 R_H C + L}{2R_H LC}\right)^2. \quad (0.33)$$

Корені характеристичного рівняння визначаються виразом

$$p_{1,2} = -\delta \pm jw_B, \quad (0.34)$$

$$\text{де } \delta = \frac{R_0 R_H C + L}{2R_H LC};$$

w_B - частота вільних коливань кола

$$(w_B = \sqrt{\frac{R_0 + R_H}{R_H L C} - \left(\frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H L C}\right)^2}).$$

Тоді струм індуктивності:

$$i_L = \frac{E}{R_0 + R_H} + Ae^{-\delta t} \cdot \sin(w_B t + \psi). \quad (0.35)$$

Напруга на конденсаторі (на навантаженні):

$$\begin{aligned} U_C = U_H = E - i_L \cdot R_0 - L \frac{di_L}{dt} = \\ = E - \left(\frac{E}{R_0 + R_H} + Ae^{-\delta t} \cdot \sin(w_B t + \psi)\right)R_0 - \\ - L(-\delta Ae^{-\delta t} \sin(w_B t + \psi) + w_B Ae^{-\delta t} \cos(w_B t + \psi)) - \\ - E \frac{R_H}{R_0 + R_H} + Ae^{-\delta t} (L \cdot \delta - R_0) \sin(w_B t + \psi) - \\ - w_B L \cdot Ae^{-\delta t} \cdot \cos(w_B t + \psi) \end{aligned} \quad (0.36)$$

За початковими умовами з (0.35) та (0.36) можна визначити A та ψ для наступного циклу зміни фази 1 та фази 2, де вже $i_L(0) \neq 0$ та $U_C(0) \neq 0$.

З кожним новим циклом середні значення $I_{L.cp}$ та $U_{H.cp}$ будуть підвищуватися і в усталеному періодичному режимі залежності $i_L(t)$ та $U_H(t)$ будуть мати вигляд наведений на рис. 3.4 та рис. 3.5.

Для загального випадку математична модель boost-конвертера може бути представлена у вигляді ітеративного відображення виду:

$$i_L(t) = F_L(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)), \quad (0.37)$$

$$u_C(t) = F_C(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)), \quad (0.38)$$

де t_k - час останньої комутації до моменту t , F_L і F_C - функції, які визначаються рівняннями кіл для фази 1 і фази 2 та параметрами елементів.

Для фази 1 миттєві значення струму і напруги визначаються виразами:

$$i_L(t) = \frac{E}{R_0} - \frac{E}{R_0} \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} + i_L(t_k) \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} \quad (0.39)$$

$$u_C(t) = u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{R_H C}(t-t_k)} \quad (0.40)$$

Відповідно, для фази 2 отримаємо:

$$\begin{aligned} i_L(t) = & \left(A_0 + A_1 e^{p_1(t-t_k)} + A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ & + \left(B_1 e^{p_1(t-t_k)} + B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ & + \left(C_1 e^{p_1(t-t_k)} + C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k) \end{aligned} \quad (0.41)$$

$$\begin{aligned} u_C(t) = & \left((1 - A_0 R_0) - (R_0 + L p_1) A_1 e^{p_1(t-t_k)} - (R_0 + L p_2) A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ & + \left((R_0 + L p_1) B_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ & + \left((R_0 + L p_1) C_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k) \end{aligned} \quad (0.42)$$

де коефіцієнти А, В, С зручно виразити з використанням заміні:

$$b = \frac{R_H R_0 C + L}{R_H L C}, \quad c = \frac{R_H + R_0}{R_H L C}, \quad d = \frac{1}{R_H L C}, \quad (0.43)$$

$$D = \sqrt{b^2 - 4c}, \quad (0.44)$$

$$p_1 = (-b + D) / 2, \quad p_2 = (-b - D) / 2,$$

$$A_0 = \frac{d}{c}, \quad A_1 = \frac{d}{2c} \left(-1 - \frac{b}{D} \right) + \frac{1}{DL}, \quad A_2 = \frac{d}{2c} \left(-1 + \frac{b}{D} \right) - \frac{1}{DL}, \quad (0.45)$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{b}{D} \right) + \frac{R_0}{DL}, \quad B_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{D} \right) - \frac{R_0}{DL}, \quad (0.46)$$

$$C_1 = \frac{1}{DL}, \quad C_2 = -\frac{1}{DL}, \quad (0.47)$$

Таким чином, математична модель підвищуючого імпульсного перетворювача для k -го періоду комутації, який включає фазу 1 та фазу 2 може бути приведена до вигляду ітеративного відображення:

$$\begin{aligned}
 i_L(t) &= F_L(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)) = \\
 &= \begin{cases} \frac{E}{R_0} - \frac{E}{R_0} \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} + i_L(t_k) \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)}, & K \text{ замкнутий} \\ \left(A_0 + A_1 e^{p_1(t-t_k)} + A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ + \left(B_1 e^{p_1(t-t_k)} + B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ + \left(C_1 e^{p_1(t-t_k)} + C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k), & K \text{ розімкнутий} \end{cases} \quad (0.48)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_C(t) &= F_C(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)) = \\
 &= \begin{cases} u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{RHC}(t-t_k)}, & K \text{ замкнутий} \\ \left((1 - A_0 R_0) - (R_0 + Lp_1) A_1 e^{p_1(t-t_k)} - (R_0 + Lp_2) A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ + \left((R_0 + Lp_1) B_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + Lp_2) B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ + \left((R_0 + Lp_1) C_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + Lp_2) C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k), & K \text{ розімк., } i_L(t) \neq 0 \\ u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{RHC}(t-t_k)}, & K \text{ розімк., } i_L(t) = 0 \quad (t_k - \text{час встановлення } i_L(t) = 0) \end{cases} \quad (0.49)
 \end{aligned}$$

Виконуючи послідовні відображення (0.48) та (0.49) можна отримати значення струму i_L та напруги u_C для довільно заданого часу t .

3.2. Аналіз параметрів та режимів імпульсного перетворювача

Пульсації напруги та струму перетворювача зображені на рис. 3.4 та рис. 3.5

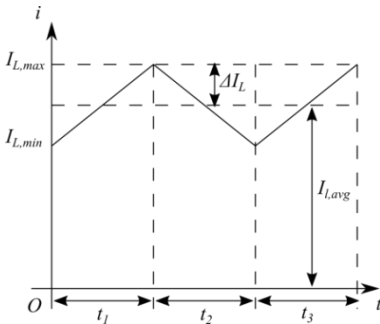


Рис. 3.4

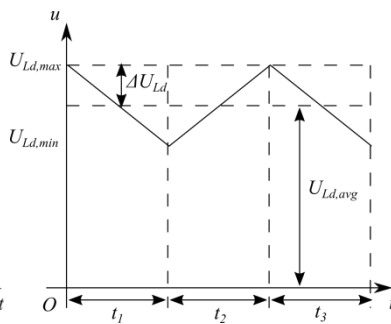


Рис. 3.5

Криві $i_L(t)$ та $U_H(t)$ показані для випадків, коли t_1 та t_2 відповідають лінійної ділянці експоненти. З урахуванням графіків для фази

$$i_L(0) = I_{L\min} = I_{Lcp} - \Delta I_L \quad (0.50)$$

$$U_C(0) = U_{H\max} = U_{Hcp} - \Delta U_H \quad (0.51)$$

Струм i_L описується виразом (0.30), а напруга U_H виразом

$$U_H = U_C = U_{c\max} e^{-\frac{t}{R_H C}}. \quad (0.52)$$

Початкові умови для фази 2 визначаються виразами:

$$i_L(0) = I_{L\max} = \frac{E}{R_0} + (I_{L\min} - \frac{E}{R_0}) e^{-\frac{R_0}{L} t_1} \quad (0.53)$$

$$U_C(0) = U_{C\min} = U_{C\max} e^{-\frac{t_1}{R_H C}} \quad (0.54)$$

Для таких початкових умов визначимо A, ψ . Виникає питання визначення періодів комутацій t_1 та t_2 від яких залежить глибина коливань напруги ΔU_H та коливань струму ΔI_L .

Задамо $\Delta I_L = K_1 \cdot I_{Lcp}$. Тоді для моменту часу $t = t_1$:

$$i_L = I_{Lcp} + K_1 \cdot I_{Lcp} = \frac{E}{R_0} + (I_{L\min} - \frac{E}{R_0}) e^{-\frac{R_0}{L} t_1},$$

$$\text{звідки } e^{-\frac{R_0}{L} t_1} = \frac{I_{Lcp} + K_1 I_{Lcp} - E / R_0}{I_{Lcp} - K_1 \cdot I_{Lcp} - E / R_0}.$$

Таким чином,

$$t_1 = -\frac{L}{R_0} \ln \frac{(1 + K_1) I_{Lcp} - E / R_0}{(1 - K_1) I_{Lcp} - E / R_0}. \quad (0.55)$$

Для визначення $U_{H,cp}$ скористуємось даними [28], які наведені для $R_0 = 0$:

$$U_{H,cp} = \frac{t_1 + t_2}{t_1} E = K_\delta \cdot E. \quad (0.56)$$

Тоді середнє значення струму в R_H :

$$I_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}}{R_H},$$

а потужність, відповідно

$$P_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}^2}{R_H} \quad (0.57)$$

Можна скористатися більш точною формулою потужності

$$P_{H.cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_H^2}{R_H} dt,$$

але простий аналіз при $t_1 = t_2 = \frac{T}{2}$ показує незначну похибку. Так для фази 1 рис. 3.5 справедлива рівність:

$$U_H = U_{H \max} - \frac{2\Delta U_H}{T/2} \cdot t.$$

Тоді за час $t = 0 \dots T/2$:

$$P_{H.cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{(U_{H \max} - \frac{4\Delta U_H}{T} t)^2}{R_H} dt = \frac{1}{R_H} (U_{H.cp}^2 + \frac{1}{3} \Delta U_H^2). \quad (0.58)$$

Якщо взяти, наприклад, $\Delta U_H = 0,1U_{H.cp}$ (а це досить великі коливання напруги), то похибка буде порівняно з (0.57) всього 0,33%.

Враховуючи, що при $R_0 = 0$ в схемі немає додаткових втрат потужності, можна стверджувати:

$$P_{дж} = P_H,$$

або

$$E \cdot I_{Lcp} = U_{H.cp} \cdot I_{H.cp},$$

$$I_{Lcp} = I_{H.cp} \cdot \frac{U_{H.cp}}{E} = I_{H.cp} \cdot \frac{K_\delta \cdot E}{E} = K_\delta \cdot I_{H.cp} \quad (0.59)$$

Тобто, схема по суті є підвищуваним трансформатором з коефіцієнтом трансформації K_δ :

$$\frac{U_{H.cp}}{E} = \frac{I_{Lcp}}{I_{H.cp}} = K_\delta. \quad (0.60)$$

Визначимо, як впливає умова $R_0 = 0$ на $U_{H.cp}$, I_{Lcp} ?

При виконанні умови $R_0 \neq 0$ вихідна напруга генератора (джерела живлення) описується виразом:

$$U_{\text{дж}} = E - I_{Lcp} \cdot R_0 \quad (0.61)$$

Тоді напруга на навантаженні

$$U_{H.cp} = K_{\delta} \cdot (E - I_{Lcp} \cdot R_0) = K_{\delta} (E - K_{\delta} \cdot I_{H.cp} \cdot R_0) = K_{\delta} (E - K_{\delta} \frac{U_{H.cp}}{R_H} R_0),$$

звідки
$$U_{H.cp} = \frac{K_{\delta} \cdot E}{1 + K_{\delta}^2 \frac{R_0}{R_H}}.$$

Відповідно, усереднені значення можна знайти за формулами:

$$I_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}}{R_H}$$

$$I_{Lcp} = K_{\delta} \cdot \frac{U_{H.cp}}{R_H} = \frac{K_{\delta}}{R_H} \cdot \frac{K_{\delta} E}{1 + K_{\delta}^2 \frac{R_0}{R_H}}.$$

В фазі І виконуються умови:

$$U_C = U_{C \max} e^{-t/R_H C}$$

$$U_{C \min} = U_{C \max} e^{-t/R_H C}$$

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{U_{H.cp} - \Delta U}{U_{H.cp} + \Delta U}.$$

При $\Delta = 0,1$ $R_H C = 20 \cdot 10^{-3}$ $t_1 = 0,004 c$.

Тоді визначимо, при якому $R_0 = 0$ по відношенню до R_H схема не буде мати переваги перед прямим підключенням R_H до джерела.

Необхідна умова:

$$U_{H.cp} > E \frac{R_H}{R_0 + R_H},$$

або:

$$\frac{K_{\delta} E}{1 + K_{\delta}^2 \cdot \frac{R_0}{R_H}} > \frac{E R_H}{R_0 + R_H}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$R_0 < \frac{R_H}{K_\delta}, \quad (0.62)$$

а при $R_0 = \frac{R_H}{K_\delta}$ схема видає таку саму напругу, що і при прямому підключенню R_H до джерела.

Повернемося ще раз до вибору $T = t_1 + t_2$.

В фазі 1 визначено t_1 , виходячи з потрібного ΔU_L . Напруга U_H в фазі

1 описується виразом (0.52). Тут $U_{C \min} = U_{C \max} e^{-\frac{t_1}{R_H C}}$, або:

$$U_{H.cp} - \Delta U_H = (U_{H.cp} + \Delta U_H) e^{-\frac{t_1}{R_H C}},$$

звідки

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{U_{H.cp} - \Delta U_H}{U_{H.cp} + \Delta U_H}$$

Якщо задати $\Delta U_H = K_1 \cdot U_{H.cp}$, то

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{1 - K_1}{1 + K_1}. \quad (0.63)$$

На наступному інтервалі часу (фаза 2) справедливою буде умова

$$t_2 \ll \frac{2\pi}{\omega_B}, \quad (0.64)$$

що також забезпечує практично лінійну зміну напруги (початкова частина експоненти).

Аналіз та вимірювання [36], що при $t_1 = t_2 = \frac{2\pi}{\omega_B} > 3 \cdot R_{HC}$ конденсатор

розряджається практично до нуля, тобто $U_{H \min} = 0$, а

$$U_{H.cp} = \frac{U_{H \max}}{2} \quad \text{і} \quad \Delta U_H = \frac{U_{H \max}}{2}.$$

Тому, для вибору величини C можна прийняти:

$$t_2 = t_1 = \frac{R_H C}{5 \dots 10} \rightarrow C.$$

Оптимальне значення коефіцієнта трансформації $K_{\delta_{opt}}$ можна визначити з умови:

$$\frac{dU_H}{dK_\delta} = \left(\frac{K_\delta E}{1 + K_\delta^2 \left(\frac{R_0}{R_H} \right)} \right)' = 0, \quad (0.65)$$

Звідки отримуємо коефіцієнт:

$$K_{\delta_{opt}} = \sqrt{\frac{R_H}{R_0}}. \quad (0.66)$$

3.3. Аналіз ефективності імпульсного перетворювача при різних формах перехідного процесу

При виборі ємності конденсатора для заданих E , L , R_0 , R_H розглянуто аперіодичний та періодичний заряд конденсатора. Серед варіантів аперіодичного заряду було обрано варіант критичного заряду [36], коли $p_{1,2} = -\delta$, який із різних варіантів аперіодичного заряду характеризується найбільшою швидкістю заряду, що має місце при умові:

$$\frac{L + R_0 R_H C}{2 R_H L C} = \frac{R_0 + R_H}{R_H L C}$$

Розв'язок відносно ємності C дає такий результат:

$$C_{KP} = \frac{L}{R_0^2 R_H} \left[(R_0 + 2R_H) + 2\sqrt{R_0 R_H + R_H^2} \right] \quad (0.67)$$

Для періодичного заряду ємність визначається умовою:

$$C < \frac{L}{R_0^2 R_H} \left[(R_0 + 2R_H) + 2\sqrt{R_0 R_H + R_H^2} \right] \quad (0.68)$$

Для встановлення величини ємності, яка забезпечить найбільшу швидкість періодичного заряду, розглянемо процес підключення кола до постійної ЕРС при нульових початкових умовах ($i_L(0) = 0$;

$u_C(0) = 0$). Розв'язок отримаємо відносно напруги u_C із більш простим та зручним для аналізу виразом.

При значеннях коренів характеристичного рівняння $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_B$ напруга та струм конденсатора визначаються виразами:

$$u_C = E \frac{R_H}{R_0 + R_H} + A e^{-\delta t} \sin(\omega_B t + \psi)$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = CA e^{-\delta t} [-\delta (\sin \omega_B t + \psi) + \omega_B \cos(\omega_B t + \psi)]$$

На початку перехідного процесу ($t = 0$) отримаємо умови:

$$A \sin \psi = -E \frac{R_H}{R_H + R_0}$$

$$A \cos \psi = -E \frac{R_H}{R_H + R_0} \cdot \frac{\delta}{\omega_0}$$

звідки

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega_B}{\delta}; \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{\omega_B}{\delta}$$

$$\sin \psi = \frac{\omega_B}{\sqrt{\omega_B^2 + \delta^2}} = \frac{\omega_B}{\omega_0}; \quad \cos \psi = \frac{\delta}{\sqrt{\omega_B^2 + \delta^2}} = \frac{\delta}{\omega_0}$$

$$A = \left(-E \frac{R_H}{R_0 + R_H} \right) / \sin \psi = -E \frac{R_H}{R_0 + R_H} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_B}.$$

Остаточно, вираз напруги конденсатора має вигляд:

$$u_C = E \frac{R_H}{R_0 + R_H} \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega_B} e^{-\delta t} \sin(\omega_B t + \psi) \right) \quad (0.69)$$

Відомо [36], що найбільшого значення напруга u_C досягає при $t = \frac{T_B}{2}$, тобто:

$$u_{C, T_B/2} = E \frac{R_H}{R_H + R_0} \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega_B} e^{\frac{-\delta T_B}{2}} \sin \left(\frac{\omega_B T_B}{2} + \psi \right) \right), \quad (0.70)$$

$$u_{C, T_B/2} = E \frac{R_H}{R_H + R_0} \left(1 + e^{\frac{-\delta \pi}{\omega_B}} \right)$$

або

$$u_{C, T_B/2} = E \frac{R_H}{R_H + R_0} \left[1 + \exp \left(-\frac{L + R_0 R_H C}{2 R_H L C} \sqrt{\frac{R_0 + R_H}{R_H L C} - \frac{(L + R_0 R_H C)^2}{4 R_H^2 L^2 C^2}} \right) \right]$$

Для визначення ємності, яка забезпечуватиме максимум напруги u_C при $t = \frac{T_B}{2}$ розглянемо рівняння:

$$\frac{du_{C, T_B/2}}{dt} = 0 \quad (0.71)$$

Розв'язок рівняння дає оптимальне значення ємності C :

$$C_{OPT} = \frac{L}{R_0 R_H} \quad (0.72)$$

3.4 Результати експериментального дослідження імпульсного перетворювача з підвищенням напруги.

Схема підвищуючого перетворювача та його реалізація показані на рис. 3.6 [35].

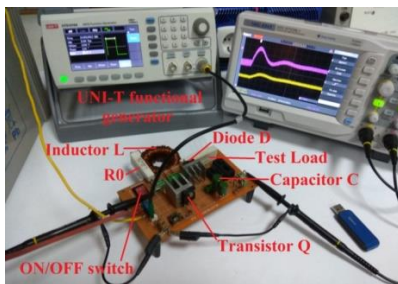
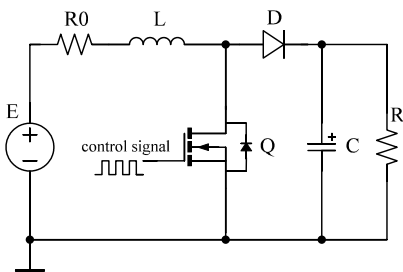


Рис. 3.6. Схема підвищуючого перетворювача та його лабораторна реалізація

3.4.1. Параметри досліджуваного перетворювача

Основні параметри розробленого підвищуючого перетворювача подано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Елементи	Параметри	Значення
Котушка індуктивності L	індуктивність	2 мГн
	Матеріал магнітного сердечника	сендаст (альсифер)
	Параметри матеріалу магнітного сердечника:	
	Початкова магнітна проникність	60
	eddy current loss coefficient	1/Гц
	Коефіцієнт втрат на гістерезис	
	Коефіцієнт додаткових втрат	
діапазон робочих частот	10 кГц	
максимальний тангенс кута втрат	0.01	

Конденсатори C	ємності	8мФ, 40мкФ, 2.1мФ, 1.94мФ
	максимальний еквівалентний послідовний опір на частоті 10kHz	70 мОм
	Максимальна еквівалентна індуктивність	10 мкГн
Діод D	найменування	30CPQ150
	тип	Шотткі
	Повторювана пікова зворотна напруга	150 В
	Максимальний середній прямий струм	30 А
Транзистор Q	найменування	STW88N65M5
	тип	MOSFET
	Максимальна напруга витік-стік	710 В
	Струм стоку	84А
	Максимальний опір між вигоком та стоком	29 мОм

3.4.2. Процеси передачі енергії

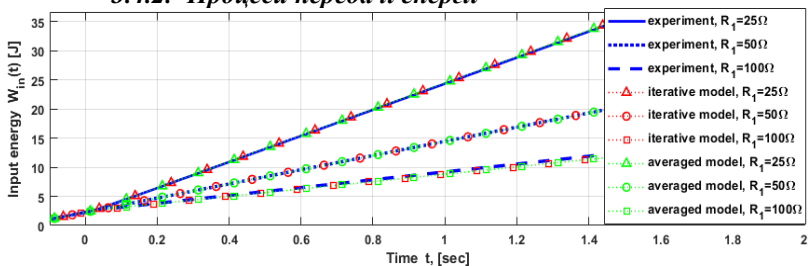


Рис. 3.7. Вхідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 8 \text{ мФ}$

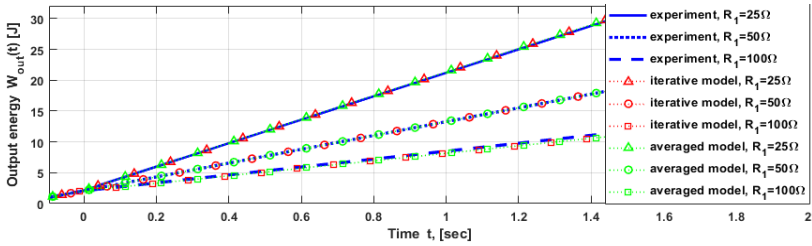


Рис. 3.8. Вихідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 8$ mF

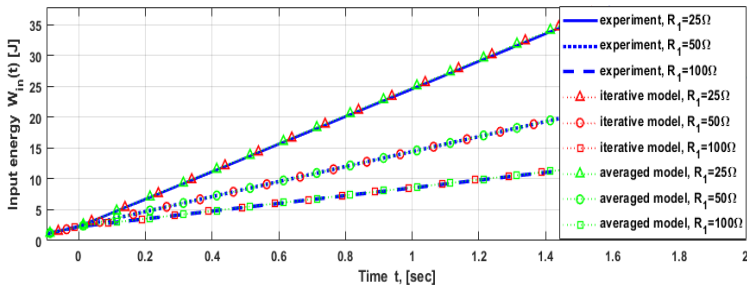


Рис. 3.9. Вхідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 40$ μ F

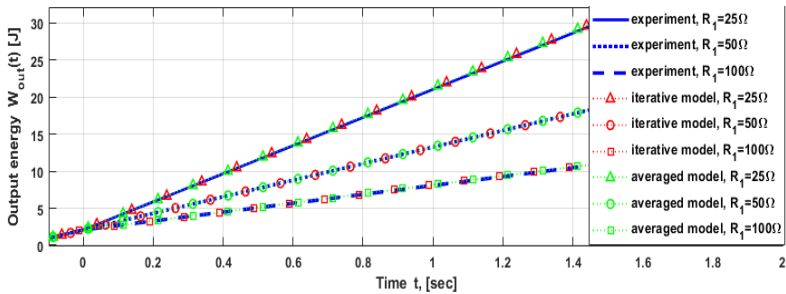


Рис. 3.10. Вихідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 40$ μ F

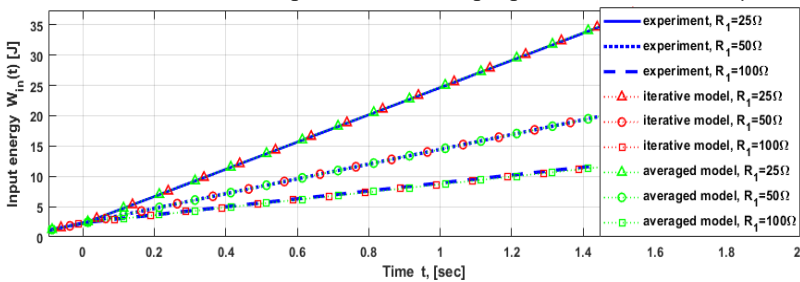


Рис. 3.11. Вхідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 2.1$ mF

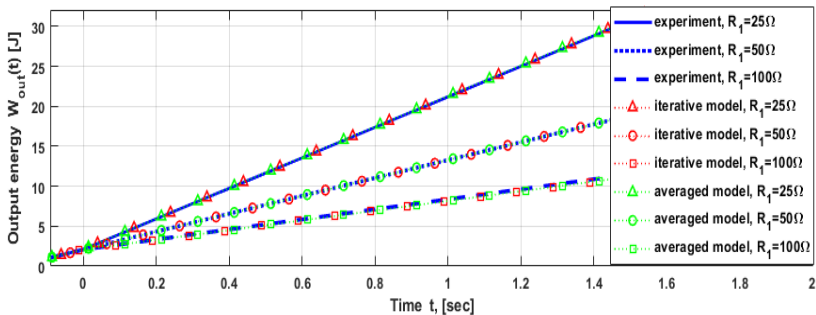


Рис. 3.12. Вихідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 2.1 \text{ mF}$

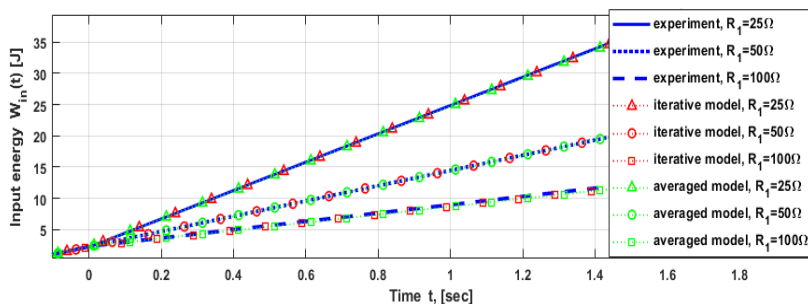


Рис. 3.13. Вхідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 1.94 \text{ mF}$

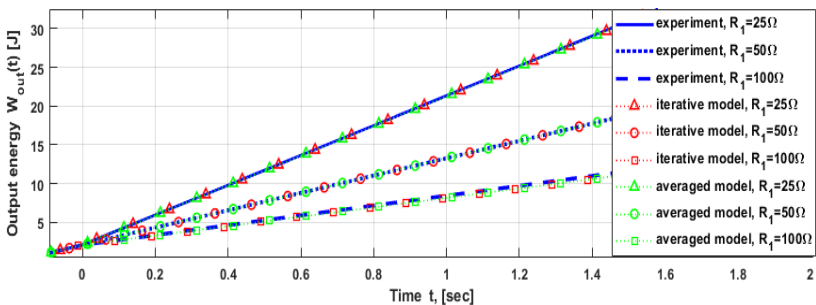


Рис. 3.14. Вихідна енергія boost-конвертера з ємністю $C = 1.94 \text{ mF}$

3.4.3. Перехідний процес при включенні перетворювача

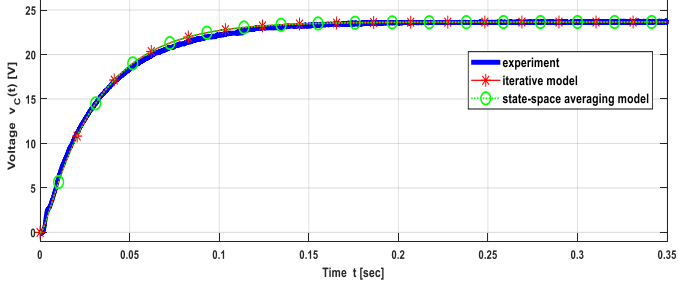


Рис. 3.15. Перехідний процес за напругою при включенні boost-конвертера з ємністю $C = 8 \text{ mF}$

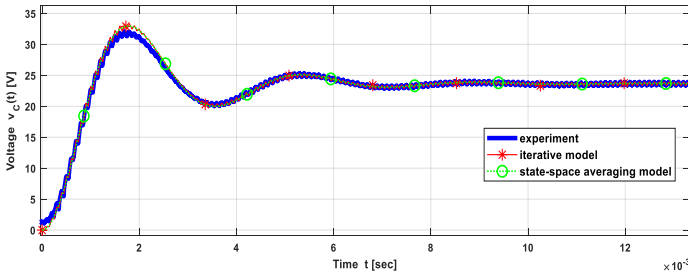


Рис. 3.16. Перехідний процес за напругою при включенні boost-конвертера з ємністю $C = 40 \text{ }\mu\text{F}$

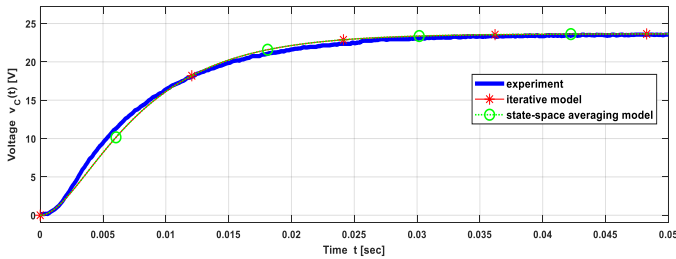


Рис. 3.17. Перехідний процес за напругою при включенні boost-конвертера з ємністю $C = 2.1 \text{ mF}$

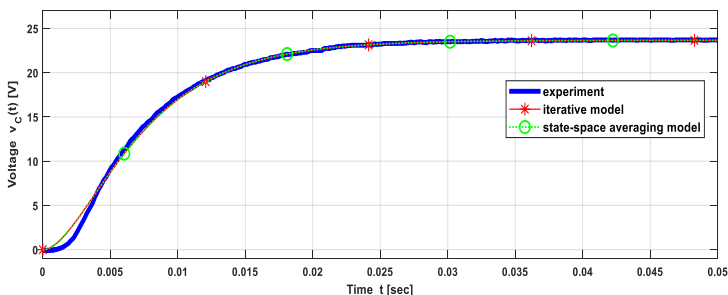


Рис. 3.18. Перехідний процес за напругою при включенні boost-конвертера з ємністю $C = 1.94 \text{ mF}$

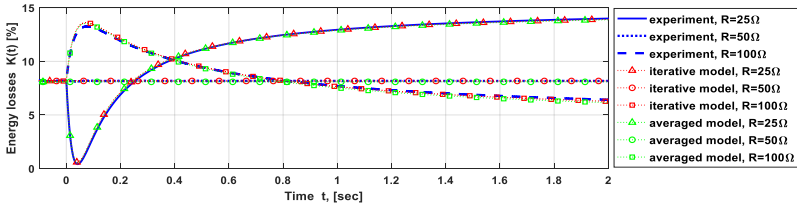
3.4.4. Аналіз ефективності експериментального зразка імпульсного перетворювача

Втрати підвищуючого перетворювача проаналізовані для часу спостереження $t \in [-T_{tr}, T_{tr}]$ де T_{tr} є тривалістю найдовшого перехідного процесу (для ємності 8 mF). Оцінки експериментальних та модельованих втрат приведені з відповідними відносними похибками моделювання (усереднена огинаюча порівнюється з усередненими експериментальними даними) [36]. Усі похибки моделювання розраховуються у відсотках за формулою:

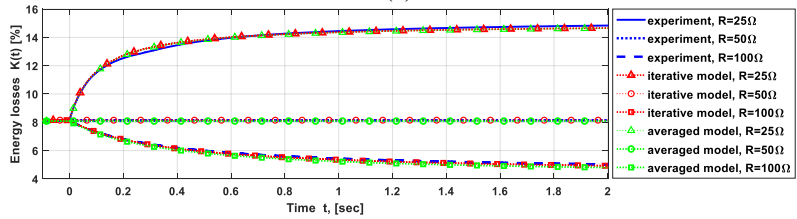
$$\varepsilon(X) = 100 \cdot \frac{|X_{\text{exp}} - X_{\text{model}}|}{\max(X_{\text{exp}}) - \min(X_{\text{exp}})} \quad (0.73)$$

де X_{exp} експериментальне значення, X_{model} - теоретичне значення.

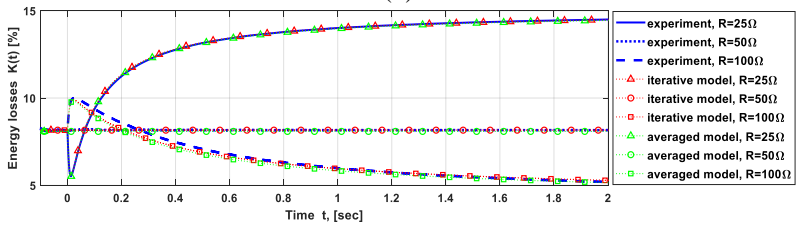
Залежності коефіцієнтів втрат приведені на рис. 3.19 для чотирьох отриманих ємностей при еквівалентному опорі джерела 1 Ом . Графіки показують, що втрати boost-конвертера суттєво залежать від значення ємності вихідного конденсатора протягом перехідного процесу на навантаженні. Після закінчення перехідного процесу максимальні коефіцієнти втрат boost-конвертера практично не залежать від значення вихідної ємності. Ємності 2.1 mF and 1.94 mF забезпечують найдовший проміжок часу, протягом якого коефіцієнт втрат менший від 10% . Таким чином, ефективність boost-конвертера може бути підвищена шляхом вибору вихідної ємності із врахуванням оцінки тривалості перехідних процесів на навантаженні



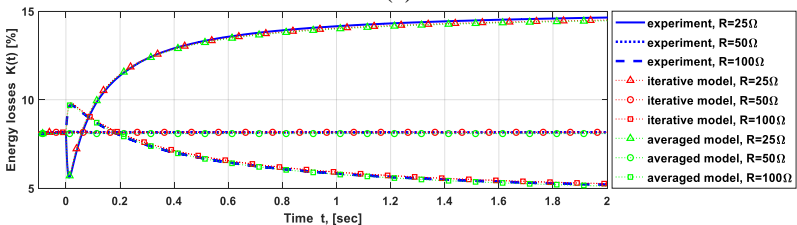
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 3.19. Втрати boost-конвертера: (а) $C=8\text{mF}$; (б) $C=40\mu\text{F}$; (в) $C=2.1\text{mF}$; (г) $C=1.94\text{mF}$

Таким чином, аналіз проведено для перехідних процесів, спричинених зміною навантаження вдвічі [36]. Початковий опір навантаження складає $50\ \Omega$. Час фази 1 (ключ замкнутий) та фази 2 (ключ розімкнутий) визначається з необхідного значення рівня пульсацій ΔU . Ємність C може визначатися чотирма різними способами.

Перший спосіб полягає у визначенні ємності перетворювача з умови критичного перехідного процесу, який виникає на межі між періодичним та неперіодичним режимами для фази 2. Отримана ємність дозволяє мінімізувати втрати у фазі 2. Основним недоліком такого підходу є те, що він не враховує форму перехідного процесу в фазі 1. Втрати енергії при критичному режимі фази 2 складають 14.26%.

Другий спосіб полягає у визначенні ємності з умови максимального підвищення вихідної напруги. Як показують результати експериментів та моделювання, спосіб забезпечує вищу ефективність. Втрати складають 11.42%. Недолік такого способу визначення ємності полягає в тому, що в цьому випадку форми перехідних процесів у часовій області не враховуються. Проте вказаний спосіб може використовуватися, якщо жорстких вимог до короткотривалих перехідних процесів немає.

Третій спосіб – визначення ємності з умови критичного режиму (між періодичним та аперіодичним режимами) для усереднених обвідних, отриманих шляхом усереднення в просторі станів. Вираз критичної ємності в такому випадку більш складний, ніж для фази 2, проте він показує всього 9.08 % втрат енергії.

Четвертий спосіб базується на визначенні ємності boost-конвертера з використанням процедури оптимізації у програмному середовищі MATLAB. Процедура реалізована функціями MATLAB. Отриманий результат достатньо близький до критичної ємності для усередненої обвідної. Втрати енергії складають близько 9.31%. Основним недоліком такого способу визначення ємності є присутність похибок числових розрахунків, які виникають в процесі виконання процедури оптимізації.

Усі похибки моделювання складають менше 3%, проте ітеративна модель не співпадає точно з коливаннями струму і напруги внаслідок наближеного відображення паразитних елементів. Таким чином, для більш точного моделювання пульсацій boost-конвертера необхідні більш складні ітеративні моделі для апроксимації характеристик напівпровідникових та пасивних елементів. Зокрема, результати досліджень елементів дробового порядку [81,82] є цікавими у зв'язку із ширшими можливостями апроксимації кривих пульсацій без значного збільшення кількості параметрів моделі.

Проведений аналіз ефективності boost-конвертера показує, що ємність критичної обвідної забезпечує найдовший час, протягом якого втрати енергії становлять менше 10% для еквівалентного опору джерела 1 Ом. Таким чином, більша кількість енергії може бути відібрана від джерела протягом перехідного процесу з вихідною ємністю 2,1 мФ, яка відповідає критичній формі обвідної.

3.5. Оцінка умов узгодження навантаження сонячного модуля

Еквівалентна схема сонячної батареї показана на рис. 3.20. Схема (рис. 3.20) включає в себе джерело струму і діод з нелінійним еквівалентним опором [35]. Таким чином, диференційний опір R_{dif} є оцінкою, необхідною для аналізу узгодженості навантаження такого джерела.

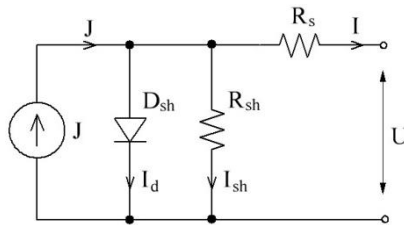


Рис. 3.20. Еквівалентна схема сонячної батареї

Проаналізуємо вплив параметрів сонячних батарей на еквівалентний диференційний опір R_{dif} , коли сонячна панель включена в коло зі струмом I і напругою U , які залежать від характеристик навантаження.

$$I = J - I_d - I_{sh} = J - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (0.74)$$

де J - струм внутрішнього джерела, який залежить від освітленості та температури сонячних батарей, I_0 - зворотний струм насичення, U_T - термічна напруга, R_s та R_{sh} еквівалентні послідовний і паралельний опори, відповідно. Вираз (0.74) може бути представлений у вигляді:

$$I \left(\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} \right) = J - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}},$$

де відношення опорів можна отримати з диференціалів:

$$dI \left(\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} \right) = -I_0 d \left(e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - 1 \right) - \frac{dU}{R_{sh}},$$

$$\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} = -I_0 \frac{d \left(e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - 1 \right)}{dI} - \frac{1}{R_{sh}} \cdot \frac{dU}{dI},$$

або

$$\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} = -\frac{I_0}{U_T} \left(\frac{dU}{dI} + R_s \right) e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - \frac{1}{R_{sh}} \cdot \frac{dU}{dI},$$

Таким чином, рівняння набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dI} \left(\frac{I_0 R_{sh}}{U_T (R_{sh} + R_s)} e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} + \frac{1}{R_{sh} + R_s} \right) = \\ = -1 - \frac{I_0 R_{sh} R_s}{U_T (R_{sh} + R_s)} e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} \end{aligned}$$

Відповідно, диференційний опір визначається за виразом:

$$R_{dif} = \frac{dU}{dI} = - \frac{1 + \frac{I_0 R_{sh} R_s}{U_T (R_{sh} + R_s)} e^{\frac{U + IR_s}{U_T}}}{\frac{1}{R_{sh} + R_s} + \frac{I_0 R_{sh}}{U_T (R_{sh} + R_s)} e^{\frac{U + IR_s}{U_T}}} \quad (0.75)$$

Результати розрахунків були перевірені для сонячної панелі Jinko JKM 260PP-60 з параметрами: $U_{oc} = 38,1$ В, $I_{sc} = 8,98$ А, $I_L = 8,99$ А, $U_{opt} = 31,1$ В, $I_{opt} = 8,37$ А, $R_s = 0,30$ Ом, $R_{sh} = 162$ Ом, $t^\circ = 25$ °С.

Враховуючи напругу внутрішнього діода U_d , теплову напругу U_T і струм I_0 :

$$U_d = U + IR_s = 31,1 + 0,3 \cdot 8,37 = 33,61 \text{ V},$$

$$U_T = \frac{k_B T}{q} n I N_c = \frac{1,3806 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 0,95 \cdot 60}{1,6022 \cdot 10^{-19}} = 1,4637 \text{ V},$$

$$I_0 = 4,6715 \cdot 10^{-11} \text{ A},$$

отримуємо диференційний опір $R_{dif} = -3,71 \text{ Ohm}$, в той час як оптимальний опір навантаження, вказаний в технічному описі сонячної батареї, складає $R_{opt} = U_{opt} / I_{opt} = 3,71 \text{ Ohm}$. Таким чином, що результати співпадають. Розрахунок для спрощеної моделі ($R_{sh} = \infty$) можна проводити за формулою [35]:

$$R_{dif} = - \frac{U_T}{I_0 e^{\frac{U+IR_s}{U_T}}} - R_s = -3,64 \text{ Ohm} \quad (0.76)$$

В такому випадку, результат близький до отриманого з уточненої моделі (Відхилення складає близько 2%). Необхідно відзначити, що значення опору R_{dif} , розраховане у відповідності із зовнішніми характеристиками, відрізняється від внутрішнього опору панелі.

В реальній ситуації $R_{ld} \neq R_{Lopt}$, Тому можливі три випадки:

- 1) збільшення ($R_{ld} > R_{Lopt}$);
- 2) зменшення ($R_{ld} < R_{Lopt}$);
- 3) збільшення і зменшення ($R_{ld} \leq R_{Lopt}$).

Для інвертуючого перетворювача [27] можна отримати умову:

$$k = \frac{D}{1-D}, \quad R_{opt} = k^2 R_{ld}$$

Якщо освітленість та температура постійні ($W = \text{const}$, $t^\circ = \text{const}$) то $D = \frac{k}{1+k}$, проте на практиці $t^\circ = \text{var}$, $W = \text{var}$, і тому коефіцієнт

заповнення імпульсів повинен залежати від параметрів панелі сонячних батарей.

3.6. Реалізація режиму точки максимальної потужності сонячного модуля

Як показано вище, щоб отримати режим точки максимальної потужності (ТМП), імпульсний перетворювач повинен забезпечувати можливості для збільшення та зменшення вихідної напруги відносно напруги панелі сонячних батарей [35].

Таким чином, дослідження необхідно виконувати для з'єднання сонячного модуля та інвертуючої схеми перетворювача.

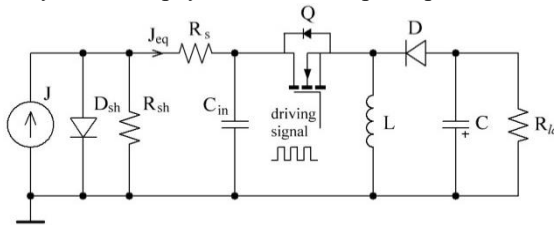


Рис. 3.21. Оптимізатор сонячного модуля на основі інвертуючого (buck-boost) перетворювача

На рис. 3.21, модель сонячної панелі вмикається відповідно до рис.3.20. Для більш чіткого подання, джерело струму J з паралельними діодом D_{sh} та опором R_{sh} може бути замінено на еквівалентне джерело струму J_{eq} , як показано на рис. 3.22.

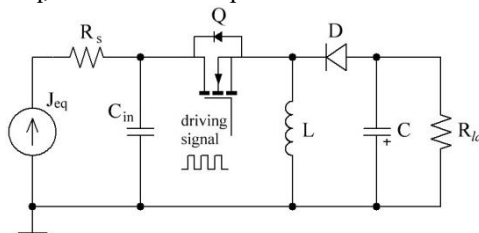


Рис. 3.22. Схема з вхідним еквівалентним джерелом струму

Струм еквівалентного джерела визначається відповідно до моделі фотоелектричного модуля (0.74), що може бути представлена наступним чином (0.77):

$$i = J - I_0 \left(e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U_d}{R_{sh}}, \quad (0.77)$$

де U_d - напруга діода D_{sh} ,

Аналіз виразу (0.77) показує, що параметри J , I_0 , U_T а також R_{sh} не залежать від напруги U_d . Таким чином, максимальна потужність, яка може бути отримана з еквівалентного джерела струму сонячної панелі, визначається з характеристики (0.78):

$$\begin{aligned} P(U_d) &= i \cdot U_d = \\ &= (J + I_0)U_d - \frac{1}{R_{sh}}U_d^2 - I_0U_d e^{\frac{U_d}{U_T}} \end{aligned} \quad (0.78)$$

З урахуванням визначених параметрів моделі сонячної панелі, точка макисмально потужності еквівалентного внутрішнього джерела може бути отримана з використанням аналітичних або числових методів.

Проте, значення напруги U_d залежить як від струму i і напруги u сонячної панелі:

$$U_d = u + iR_s, \quad (0.79)$$

Вирази (0.78) і (0.79) показують, що різні значення напруги u та струму i , які залежать від навантаження, можуть забезпечувати одну і ту саму робочу точку еквівалентного внутрішнього джерела струму. Напруга сонячної панелі u та струм i можуть приймати будь-які значення, що відповідають умовам (0.77) і (0.79). У той же час, точні значення u і i визначаються зовнішньою схемою перетворювача, який підключений до сонячної панелі [35].

Таким чином, проблема відстеження точки максимальної потужності (ВТМП, MPPT - Maximum Power Point Tracking) може бути розділена на дві частини:

1) відстеження точки максимальної потужності еквівалентного внутрішнього джерела струму, з метою отримання кращих можливостей відбору енергії, використовуючи аналітичний вираз (0.78);

2) відстеження точки максимальної зовнішньої потужності з урахуванням навантаження та критеріїв передачі енергії.

Для визначення найкращої можливої ТМП сонячної панелі з інвертуючим перетворювачем (рис. 3.22), проаналізуємо дві еквівалентні схеми, для замкнутого і розімкнутого ключа, відповідно.

При замкнутому ключі еквівалентна схема має вигляд рис. 3.23.

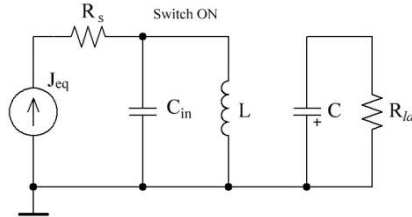


Рис. 3.23. Еквівалентна схема перетворювача при замкнутому ключі

Струм котушки індуктивності збільшується за рахунок впливу сонячної панелі і конденсатора C_{in} . Вихідний конденсатор C розряджається на опір навантаження. На рис. 3.24 показана еквівалентна схема при розімкнутому ключі.

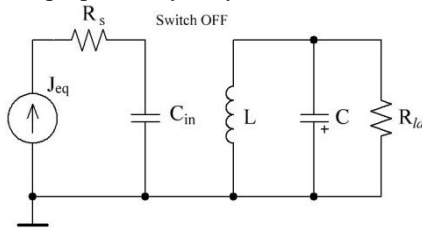


Рис. 3.24. Еквівалентна схема при розімкнутому ключі

При розімкнутому ключі, вхідний конденсатор заряджається за сонячною панеллю, в той час як індуктивність L заряджає вихідний конденсатор і збільшує напругу на опорі навантаження R_{ld} .

Для аналізу ТМП сонячної панелі, яка може забезпечуватися інвертуючим перетворювачем, зручно використовувати теорію усереднення в просторі станів [26],

Стан кола при замкнутому ключі описується виразом (0.80):

$$\begin{bmatrix} C_{in} \frac{du}{dt} \\ L \frac{di_L}{dt} \\ C \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{ld}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (0.80)$$

де u - напруга сонячної панелі, i – сила струму сонячної панелі, що генерується еквівалентним джерелом J_{eq} , i_L - сила струму котушки індуктивності, u_C - напруга навантаження. Відповідно, вираз (0.81) описує стан кола при розімкненому ключі.

$$\begin{bmatrix} C_{in} \frac{du}{dt} \\ L \frac{di_L}{dt} \\ C \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \frac{1}{R_{ld}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (0.81)$$

Усереднена модель (0.82) отримана шляхом додавання матриць схем (0.80) і (0.81) з ваговими коефіцієнтами, які відповідають коефіцієнту заповнення імпульсів D :

$$\begin{bmatrix} C_{in} \frac{du}{dt} \\ L \frac{di_L}{dt} \\ C \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -D & 0 \\ D & 0 & (1-D) \\ 0 & (1-D) & \frac{1}{R_{ld}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (0.82)$$

Модель сонячної панелі описується наведеними вище рівняннями (0.77) і (0.79). У сталому режимі, після завершення перехідних процесів, значення, i_L , u_C залишаються незмінними, а похідні рівні нулю (0.83).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -D & 0 \\ D & 0 & (1-D) \\ 0 & (1-D) & \frac{1}{R_{ld}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (0.83)$$

Вираз (0.83) дозволяє отримувати напруги і струми схеми, показаної на рис. 3.22, після завершення перехідних процесів.

Беручи до уваги значення сили струму J_{MPP} та напруга U_{dMPP} у точці максимальної потужності еквівалентного внутрішнього джерела, ми можемо описати схему (рис. 3.22) за допомогою наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} -Di_L + J_{MPP} = 0, \\ Du + (1-D)u_C = 0, \\ (1-D)i_L + \frac{u_C}{R_{ld}} = 0, \\ u + R_s \cdot J_{MPP} = U_{dMPP}. \end{cases} \quad (0.84)$$

Струм J_{MPP} і напруга U_{dMPP} точки максимальної потужності еквівалентного внутрішнього джерела можуть бути оцінені за параметрами фотоелектричних елементів, виходячи з виразів (0.78) і (0.79). Таким чином, система (0.84) дозволяє визначити коефіцієнт заповнення екруючих імпульсів D , який забезпечує ТМІ внутрішнього еквівалентного джерела струму:

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{D} J_{MPP}, \\ u = U_{dMPP} - R_s \cdot J_{MPP}, \\ u_C = -\frac{D(U_{dMPP} - R_s J_{MPP})}{(1-D)}, \\ \frac{1-D}{D} J_{MPP} - \frac{D(U_{dMPP} - R_s J_{MPP})}{R_{ld}(1-D)} = 0. \end{cases} \quad (0.85)$$

Оскільки J_{MPP} і U_{dMPP} оцінюються, за фізичними параметрами сонячних елементів, то ми можемо визначити коефіцієнт заповнення сигналу керування інвертуючого імпульсного перетворювача, який

забезпечує ТМП еквівалентного внутрішнього джерела струму. Для цього, необхідно розв'язати останнє рівняння системи (0.85), яке можна подати у вигляді (0.86):

$$\frac{(1-D)^2}{D^2} J_{MPP} - \frac{(U_{dMPP} - R_s J_{MPP})}{R_{ld}} = 0, \quad (0.86)$$

або

$$aD^2 + bD + c = 0, \quad (0.87)$$

де

$$a = J_{MPP} - \frac{U_{dMPP} - R_s J_{MPP}}{R_{ld}},$$

$$b = -2J_{MPP},$$

$$c = J_{MPP},$$

Таким чином, значення коефіцієнта заповнення, яке забезпечує ТМП еквівалентного внутрішнього джерела, визначається з виразів:

$$D_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (0.88)$$

$$D_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (0.89)$$

Формули (0.85) - (0.89) описують математичну модель, яка визначає режим інвертуючого перетворювача, що забезпечує максимально можливий відбір енергії сонячного модуля з урахуванням характеристик еквівалентного внутрішнього джерела струму [35].

Слід зазначити, що в деяких випадках ТМП на навантаженні може не співпадати точно з ТМП еквівалентного внутрішнього джерела струму. Тоді, значення потужності ТМП на навантаження може бути збільшене додатково, за рахунок зменшення паразитних опорів елементів схеми перетворювача.

При наявності обмежень щодо параметрів елементів перетворювача постійного струму (розмір друкованої плати вартість або ін.), ТМП на навантаженні може відслідковуватися також із врахуванням залежності між i , u а також u_C , отриманої безпосередньо із (0.83) та (0.85).

Таблиця 3.2 – Параметри режиму точки максимальної потужності

R, O м	t°C	S,	Коефіцієнт заповнення D в точці максимальної потужності		
			експеримент	модель	відносна похибка
2,65	50	600	0,415	0,408	1,7%
6,25	33	600	0,50	0,505	1%
10,6	46	600	0,586	0,578	1,4%
21,3	42	600	0,66	0,658	0,3%

У таблиці 3.2 показані коефіцієнти заповнення D , що забезпечують ТМП та можуть бути отримані з освітленості S і температури t° сонячної панелі [35]. Точність моделювання оцінюється відносною похибкою (0.90):

$$\varepsilon = 100 \cdot \left| D_{\text{exp.}} - D_{\text{model}} \right| / D_{\text{exp.}}, \quad (0.90)$$

де $D_{\text{exp.}}$ - експериментальний коефіцієнт заповнення в ТМП, D_{model} - коефіцієнт заповнення в ТМП, отриманий з моделі. Максимальна похибка модельованого значення коефіцієнта заповнення в ТМП становить 1,7% по відношенню до експериментального значення.

Отримані результати свідчать, що процедура ВТМП може бути реалізована на основі характеристик еквівалентного внутрішнього джерела струму, які залежать від значень освітленості і температури.

Таким чином, аналіз узгодженості навантаження проведено для фотоелектричного модуля, що функціонує як джерело постійного струму з нелінійними паразитними елементами.

Відповідно до отриманих результатів, схема інвертуючого імпульсного перетворювача обрана для збільшення відбору енергії від сонячного модуля.

Параметри режиму точки максимальної потужності визначені шляхом аналізу диференційного опору і параметрів еквівалентного внутрішнього джерела струму фотоелектричного модуля.

3.7. Електрохімічний конденсатор як накопичувач енергії сонячної фотоелектричної системи

З метою підвищення ефективності відбору енергії від фотоелектричних модулів доцільно використовувати електрохімічні

конденсатори, які дозволяють компенсувати значні пікові навантаження.

Розглянемо ідеалізовану модель конденсатора, що приєднаний паралельно до сонячної панелі. Струм такого конденсатора прямо пропорційний ємності та похідній від напруги за часом:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Відповідно, максимальна потужність такого конденсатора складає:

$$P_{\max} = u_{\max} \cdot i_{\max} = C \cdot u_{\max} \cdot \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}$$

Чим менша ємність конденсатора C , тим більшою повинна бути величина похідної від напруги за часом для забезпечення передачі однієї і тієї ж потужності. Таким чином, збільшення ємності конденсатора призводить до зниження вимог щодо частоти перемикання ключів імпульсного перетворювача [36,83]. З такою метою доцільно використовувати електрохімічні конденсатори (ЕК), які характеризуються великою еквівалентною ємністю та малим паразитним опором. Застосування ЕК у пристроях відслідковування точки максимальної потужності фотоелектричних модулів дозволить суттєво спростити будову контроллера та алгоритми керування.

З метою контролю характеристик електрохімічних конденсаторів виконуються тести, які включають вимірювання ємності та еквівалентного послідовного опору на змінному струмі [84,85,94–97,86–93].

Тестування ємності проводиться для оцінки та контролю електричної ємності, яка є основним параметром ЕК. Як було вказано вище, ЕК характеризується складною внутрішньою структурою та його ємність може бути оцінена тільки як еквівалентна ємність схеми заміщення ЕК із багатьма RC-ланками.

Зарядний та розрядний тести ємності дозволяють отримати наближене значення еквівалентної ємності ЕК з використанням моделі ідеального конденсатора (0.91):

$$v(t) = \frac{1}{C_0} \int_0^t i(\tau) d\tau + V_0, \quad (0.91)$$

де t – час, $v(t)$ – напруга конденсатора, $i(t)$ – струм конденсатора V_0 – початкова напруга конденсатора. Описані тести ємності

виконуються при постійному струмі $i(t) = I$ протягом періоду часу T . Результатами комбінованого тестування є дві величини еквівалентної ємності, які відповідають зарядному та розрядному тестам.

$$C = I \cdot T / (V(T) - V_0). \quad (0.92)$$

де I – значення постійного струму; T – час заряду або розряду; $V(T)$ – напруга ЕК в момент T ; V_0 – початкова напруга. Для зарядного тесту значення струму I додатне, а для розрядного тесту – від’ємне.

Більш точні методи тестування ємності базуються на імпедансній спектроскопії та забезпечують оцінку ємності як частотно-залежної величини [83,88,91] відповідно до виразу:

$$C(s) = \frac{I(s)}{s \cdot V(s)} = \frac{1}{s \cdot Z(s)}, \quad (0.93)$$

де s – комплексна частота, $I(s)$ та $V(s)$ струм та напруга ЕК відповідно, $Z(s)$ – імпеданс ЕК. Вираз (0.93) показує, що ємність ЕК є функцією частоти. Тоді, для більш точного контролю можуть бути проведені два окремі тести для дійсної та уявної частин ємності ЕК у частотній області.

Для прикладу, зарядні та розрядні тести ємності проведено для ЕК НР0005-0023В (NESS Capacitor) із номінальною ємністю 5Ф та максимальною напругою 2,3В. Позитивний та негативний електроди ЕК виготовлені з пористого вуглецю з великою площею поверхні. Електроди занурені в електроліт та розділені плівкою сепаратора відповідно до структури ЕК.

Результати були отримані з (0.92) для напруги заряду $V(T) = 2 \text{ V}$ та напруги розряду $V_0 = 1 \text{ V}$. Результати показують, що виміряна ємність залежить від умов вимірювання, таких як струм та напруга заряду/розряду, час релаксації перед та між вимірюваннями, частота змінної напруги.

Табл 3.3. Ємність ЕК (5Ф, 2.3В), визначена зарядно-розрядним методом

Режим заряду		Режим розряду	
Струм, мА	Ємність, Ф	Струм, мА	Ємність, Ф
5	7.48	5	5.88

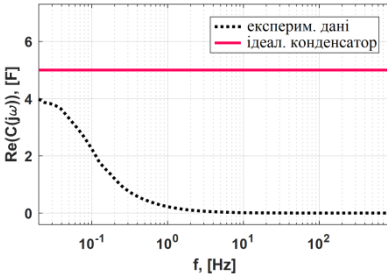
90	5.1	90	5.2
1800	3.9	1800	3.25

Далі імпеданс (рис. 3.25) ЕК із номінальною ємністю 5Ф та максимальною напругою 2,3В був отриманий шляхом вимірювань при змінному струмі у частотному діапазоні від 10мГц до 10Гц із використанням імпедансного аналізатора EG&G. Еквівалентна ємність отримана за формулою (0.93). Відхилення оцінюються із використанням формули нормованої відносної похибки:

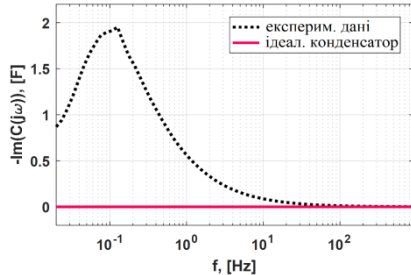
$$E(M(\omega_k), Y(\omega_k)) = \frac{|M(\omega_k) - Y(\omega_k)|}{\max(Y(\omega_k)) - \min(Y(\omega_k))}, \quad (0.94)$$

де $Y(\omega_k)$ - k -й відлік експериментальних даних, $M(\omega_k)$ - k -й відлік модельованих даних на частоті ω_k . Середньоквадратичні значення отримані для похибок ε_n виразом (0.94) з використанням (0.95):

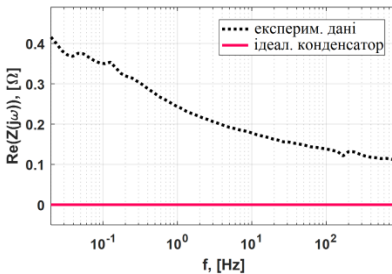
$$RMS(\varepsilon) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{n=1}^K \varepsilon_n^2}, \quad (0.95)$$



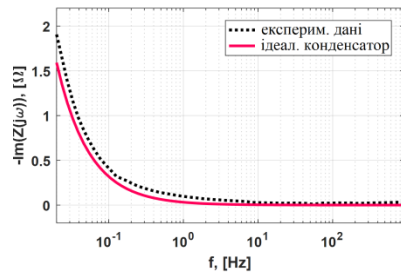
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 3.25. Модель ЕК на основі ідеального конденсатора: (а) дійсна частина ємності (середньоквадр. похибка 111.4%); (б) уявна частина ємності (середньоквадр. похибка 43.8%) (с) дійсна частина імпедансу (середньоквадр. похибка 79.4%); (д) уявна частина імпедансу (середньоквадр. похибка 4.7%)

Результати, зображені на рис. 3.25 показують проблеми визначення еквівалентної ємності ЕК [83]. Рис. 3.25(д) показує, що уявна частина імпедансу СК з номінальною ємністю 5Ф майже співпадає з уявною частиною імпедансу ідеального конденсатора ємністю 5Ф. Проте еквівалентна комплексна ємність ЕК суттєво відрізняється від характеристик ідеального конденсатора, що показано на рис. 3.25. Такі результати пов'язані із проблемами, описаними у [94,98–100]. Тому, задача контролю параметрів ЕК вимагає розвитку методів оцінки еквівалентних параметрів ЕК із більш точним моделюванням характеристик пористих електродів.

Більш деталізована еквівалентна схема заміщення ЕК показана на рис. 3.26 у відповідності з [83–85,87].

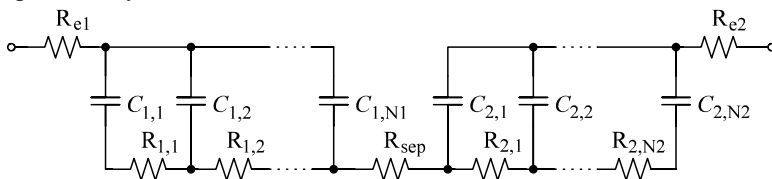


Рис 3.26. Деталізована еквівалентна схема ЕК

На рис. 3.26 $C_{1,1}, C_{1,2}, \dots, C_{1,N1}, R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{1,N1}$ - ємності та опори першого електрода; $C_{2,1}, C_{2,2}, \dots, C_{2,N2}, R_{2,1}, R_{2,2}, \dots, R_{2,N2}$ - ємності та опори другого електрода, відповідно; R_{e1}, R_{e2} - послідовні опори електродів; - опір сепаратора. На даний час відома велика кількість моделей імпедансу ЕК [84–88], які можуть використовуватися для контролю параметрів ЕК на етапах виробництва та експлуатації. Як показано в [84], для точного моделювання ЕК необхідні моделі високих порядків. У роботах [88,91,101–104] показано, що імпеданс ЕК з пористими електродами, які мають властивості самоподібності [84,105], можуть бути виражені з використанням передавальних функцій дробових порядків [91,101,105]. Моделі дробових порядків розглядаються, що

розглядаються у [88,91,97,101,103,104], можуть бути виражені поліноміальними функціями дробових степенів [91,104,106–108]:

$$Z(s) = R_0 + \frac{\sum_{n=0}^N A_n \cdot s^{\alpha_n}}{\sum_{m=0}^M B_m \cdot s^{\beta_m}}, \quad (0.96)$$

де α_n та β_m – дробові степені комплексної частоти s , R_0 – послідовний активний опір, A_n та B_m – коефіцієнти чисельника і знаменника відповідно. Для задач контролю параметрів ЕК, дробова модель ЕК повинна забезпечувати хороший баланс між точністю та складністю виразів для ефективного використання переваг дробового моделювання характеристик еквівалентної схеми пористого електрода.

Необхідно зазначити, що зі збільшенням кількості елементів дробового порядку в моделі ЕК, ефективність її застосування знижується, оскільки зростає кількість параметрів моделі, і, відповідно, зростає її складність у часовій області.

Описані недоліки в основному притаманні дробовим моделям ЕК з великою кількістю ланок із паралельними опорами. [103] Такі моделі імпедансу виражаються у часовій області функціями Міттаг-Леффлера, які є незручними для практичного використання, оскільки вимагають великих обчислювальних потужностей для розрахунку. З іншої сторони, необхідно враховувати, що електричні характеристики електродів ЕК є різними внаслідок того, що складна геометрія нанопор або нанотрубок [84,87,88] не може бути точно повторена у двох різних електродах.

Іншою причиною відмінності між характеристиками двох електродів є різниця між властивостями додатних та від’ємних йонів. Таким чином, для точної апроксимації характеристик та контролю параметрів модель ЕК повинна включати як мінімум два різні імпеданси дробового порядку [83].

3.8. Методологія контролю параметрів ЕК на основі моделей дробового порядку

Імпеданс та еквівалентна ємність ЕК можуть бути апроксимовані моделлю (0.97) відповідно до [83,91,98,101,103–105].

$$Z(s) = R_0 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{s^{\gamma_i} \cdot C_i}, \quad (0.97)$$

де γ_i - дробовий порядок i -ї ланки моделі. Відповідне зворотнє перетворення Лапласа описується виразом (0.98):

$$h(t) = L^{-1}\{Z(s)\} = R_0 \cdot \delta(t) + \sum_{i=1}^N \frac{t^{\gamma_i-1}}{C_i \cdot \Gamma(\gamma_i)} \cdot u(t), \quad (0.98)$$

де t - час, $\delta(t)$ дельта-функція Дірака, $u(t)$ - функція Хевісайда, $\Gamma(\gamma)$ Гамма-функція [98,103,104,107]. Модель (0.97) вибрана для розвитку методології контролю параметрів ЕК оскільки у часовій області вона описується виразом імпульсної характеристики, який не містить функцій Міттаг-Леффлера.

Для апроксимації експериментальних даних [83] цільова функція визначена як середноквадратичне значення нормованих відносних похибок для імпедансу та еквівалентної ємності ЕК.

$$\varepsilon_{\text{Re}Z}(x) = E\left(\text{Re}\left(Z_{\text{fit}}(j\omega_k, x)\right), \text{Re}\left(Z_{\text{exp}}(j\omega_k)\right)\right),$$

$$\varepsilon_{\text{Im}Z}(x) = E\left(\text{Im}\left(Z_{\text{fit}}(j\omega_k, x)\right), \text{Im}\left(Z_{\text{exp}}(j\omega_k)\right)\right),$$

$$\varepsilon_{\text{Re}C}(x) = E\left(\text{Re}\left(C_{\text{fit}}(j\omega_k, x)\right), \text{Re}\left(C_{\text{exp}}(j\omega_k)\right)\right),$$

$$\varepsilon_{\text{Im}C}(x) = E\left(\text{Im}\left(C_{\text{fit}}(j\omega_k, x)\right), \text{Im}\left(C_{\text{exp}}(j\omega_k)\right)\right),$$

$$\varepsilon_{\text{RMS}}(x) = \text{RMS}\left(\{\varepsilon_{\text{Re}Z}(x), \varepsilon_{\text{Im}Z}(x), \varepsilon_{\text{Re}C}(x), \varepsilon_{\text{Im}C}(x)\}\right), \quad (0.99)$$

де $Z_{\text{exp}}(j\omega_k)$, $C_{\text{exp}}(j\omega_k)$ - експериментальні значення, отримані з аналізатора імпедансу; $Z_{\text{fit}}(j\omega_k, x)$, $C_{\text{fit}}(j\omega_k, x)$ - відповідні значення апроксимуючих функцій з вектором параметрів $x = \{R_0, C_1, \gamma_1, C_2, \gamma_2, \dots, C_N, \gamma_N\}$ для N ланок дробового порядку. Процедура апроксимації описується виразом:

$$\min_x e(x) \quad (0.100)$$

при умові:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(Z_{\text{exp}}(j\omega)) - D_{\text{Re}} < \operatorname{Re}(Z_{\text{fit}}(j\omega, x)) < \operatorname{Re}(Z_{\text{exp}}(j\omega)) + D_{\text{Re}}, \\ \operatorname{Im}(Z_{\text{exp}}(j\omega)) - D_{\text{Im}} < \operatorname{Im}(Z_{\text{fit}}(j\omega, x)) < \operatorname{Im}(Z_{\text{exp}}(j\omega)) + D_{\text{Im}}, \end{cases} \quad (0.101)$$

де D_{Re} та D_{Im} додатні різниці, які визначають умови для дійсної та уявної частин відповідно.

$$D_{\text{Re}} = q \cdot \left(\max \left(\operatorname{Re} \left(Z_{\text{exp}}(j\omega, x) \right) \right) - \min \left(\operatorname{Re} \left(Z_{\text{exp}}(j\omega, x) \right) \right) \right), \quad (0.102)$$

$$D_{\text{Im}} = q \cdot \left(\max \left(\operatorname{Im} \left(Z_{\text{exp}}(j\omega, x) \right) \right) - \min \left(\operatorname{Im} \left(Z_{\text{exp}}(j\omega, x) \right) \right) \right), \quad (0.103)$$

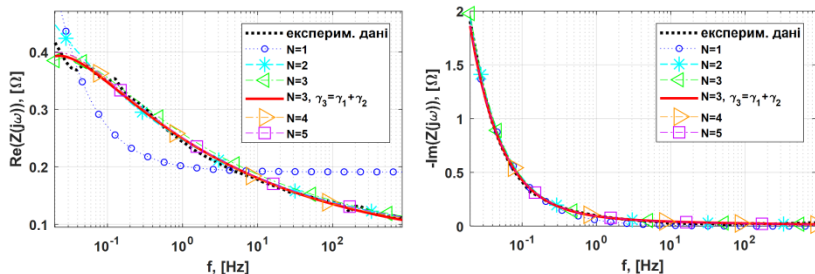
де типові значення $q = 0.05$. Апроксимація для ЕК була виконана для різних кількостей ланок N моделі (0.100). Як приклад, приведено результати апроксимації характеристик зразка ЕК у таблиці 3.4 [83].

Таблиця 3.4. Отримані моделі ЕК

N	$C_1,$	$C_2,$	$C_3,$	$C_4,$	$C_5,$	$R_0,$ Ом	$\gamma_1,$	$\gamma_2,$	$\gamma_3,$	$\gamma_4,$	$\gamma_5,$	$e,$ %
	$\frac{\Phi}{e^{1-\gamma_1}}$	$\frac{\Phi}{e^{1-\gamma_2}}$	$\frac{\Phi}{e^{1-\gamma_3}}$	$\frac{\Phi}{e^{1-\gamma_4}}$	$\frac{\Phi}{e^{1-\gamma_5}}$							
1	3.37	–	–	–	–	0.191	0.887	–	–	–	–	10.28
2	4.37	3.61	–	–	–	0.057	0.999	0.184	–	–	–	2.72
3	3.37	9.50	8.94	–	–	0.062	0.198	0.974	1.082	–	–	2.49
3*	3.43	14.8	6.89	–	–	0.050	0.184	0.884	1.068	–	–	1.46
4	261.2	5.11	4.59	14.69	–	0.068	1.037	1.037	0.214	0.214	–	1.394
5	30.5	6.61	7.42	49.57	6.83	0.068	1.037	0.214	0.214	1.037	1.037	1.393

* 3 - модель із трьох ланок, визначена з умовою $\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2$.

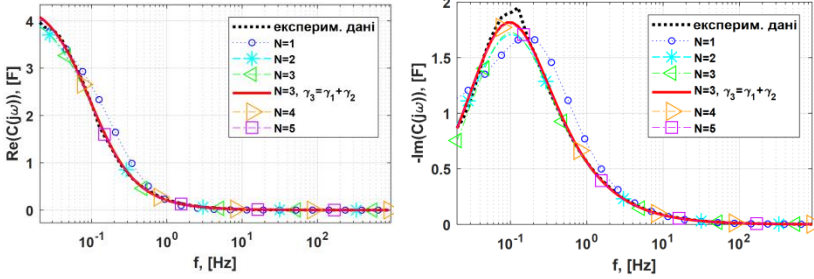
На рисунках зображені графіки дійсної та уявної частин імпедансу для кожної моделі з Табл. 3.4.



(a)

(b)

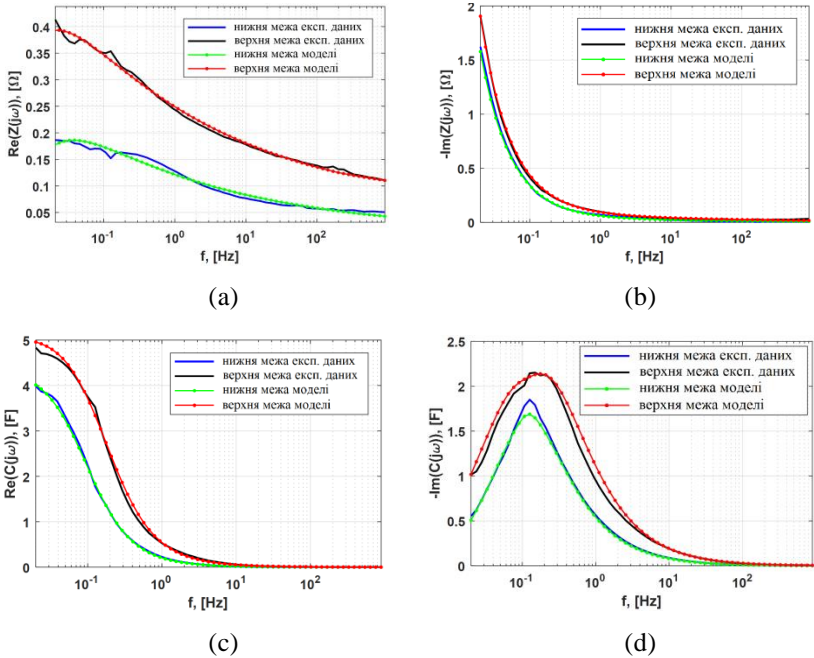
Рис. 3.27. Результати моделювання імпедансу ЕК: (а) дійсна частина;
(б) уявна частина



(a)

(b)

Рис. 3.28. Результати моделювання ємності ЕК: (а) дійсна частина;
(б) уявна частина



(a)

(b)

(c)

(d)

Figure 3.29. Межі характеристик ЕК: (а) дійсна частина імпедансу;

(b) уявна частина імпедансу; (c) дійсна частина ємності; (d) уявна частина ємності

Таблиця 3.5. Інтервали параметрів моделі

Параметри	$C_1,$ $\frac{\Phi}{c^{1-\gamma_1}}$	$C_2,$ $\frac{\Phi}{c^{1-\gamma_2}}$	$C_3,$ $\frac{\Phi}{c^{1-\gamma_3}}$	$R_0,$ Ом	γ_1	γ_2	γ_3
Верхня межа	6.20	20.30	8.09	0.071	0.213	0.901	1.114
Нижня межа	3.43	14.80	6.21	0.001	0.139	0.864	1.003

3.9. Розробка нових типів електроприводів повороту сонячної панелі

В більшості електромагнітних крокових двигунів як лінійного, так і обертового типів, наприклад [109–111], за принципом дії використовується тангенціальна складова тягового зусилля в повітряному проміжку. Ця складова на порядок нижча нормальної складової тягового зусилля підйомного електромагніту.

В роботі [112] запропонована конструкція лінійного крокового електричного двигуна, у якого за принципом дії використовується електромагнітне зусилля тяжіння між індуктором та якорем, і який має велику довжину переміщення. Однак, двигун має громіздку конструкцію.

В роботі [113] розглядається вдосконалена конструкція лінійного крокового двигуна, яка наведена на рис. 3.30.

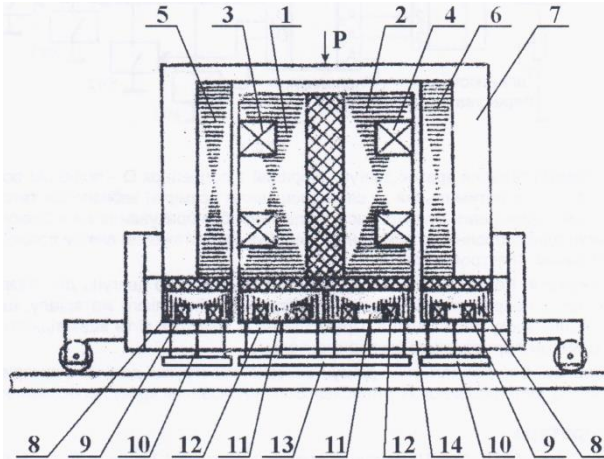


Рис. 3.30. Вдосконалена конструкція лінійного крокового двигуна.

Двигун має два тягових електромагніти, що складаються з осердь 1 та 2 з обмотками 3 та 4, а також якорів 5 та 6. Якори тягових електромагнітів встановлені у корпусі 7 з можливістю регулювання кроку переміщення (на рис. 3.30 не показані).

З якорями 5 та 6 зв'язані гальмівні електромагніти 8 з обмотками 9, а з осердями 1 та 2 – гальмівні електромагніти 11 з обмотками 12. Дві обмотки 9 увімкнуті послідовно, аналогічно увімкнуті дві обмотки 12. З осердями 8 та 11 жорстко зв'язані гальмівні колодки 10 та 13. Осердя 8 та 11 мають можливість рухатися у межах робочого повітряного проміжку у напрямку, перпендикулярному руху. Якір 14 є спільним для всіх гальмівних електромагнітів. Нерухома частина 15 може бути виконана з будь-якого матеріалу, однак краще брати матеріал, який має кращі фрикційні властивості.

Однонаправлений рух електромагніту забезпечується відповідною послідовністю подачі напруги на обмотки електромагнітів. Так, наприклад, для пересування вліво графік подачі напруг на обмотки показаний на рис. 3.31, а), а вправо – на рис. 3.31, б).

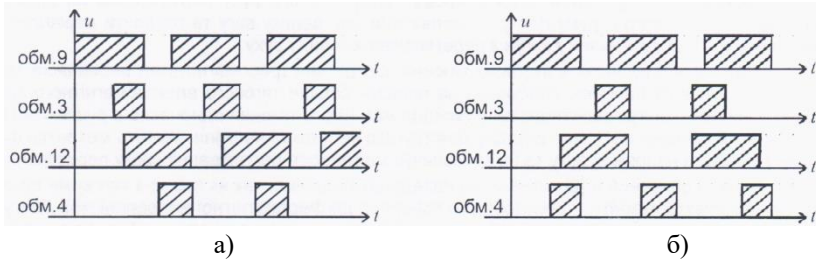


Рис. 3.31. Графіки напруги на обмотках електромагнітів: для пересування вліво а), для пересування вправо б).

В односторонньому варіанті такий двигун може рухати різні предмети за умови, що їх вага перевищує тягове зусилля двигуна. У двосторонньому варіанті двигун забезпечує переміщення без цього обмеження.

Недоліком конструкції є те, що сила тертя гальмівних колодок повинна перевищувати тягове зусилля тягових електромагнітів, що потребує великої площі гальмівних колодок. Крім того, при роботі в режимах позиціонування обмотки гальмівних електромагнітів знаходяться під напругою, що з точки зору втрат потужності неефективно.

У процесі дослідження розроблено дві конструкції лінійного крокового електричного двигуна, які не мають вищенаведених недоліків і можуть застосовуватися в приводах поворотів сонячних панелей. Конструкції виконані в циліндричному варіанті.

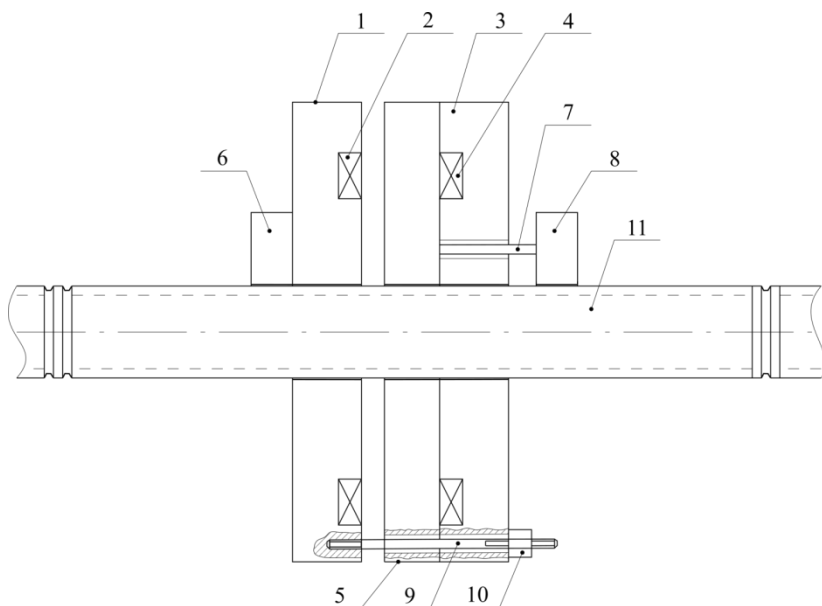


Рис. 3.32. Конструкція лінійного крокового електромагнітного двигуна.

В першій конструкції (рис. 3.32) активна частина двигуна містить тяговий електромагніт 1 з обмоткою 2, тяговий електромагніт 3 з обмоткою 4, якір 5 та електромагніти-фіксатори 6 і 8.

Фіксатор 6 жорстко зв'язаний з електромагнітом 1, а фіксатор 8 за допомогою штока 7 – з якорем 5. Кожен фіксатор включає свій магнітопровід, обмотку збудження, пружину, яка діє на рухомий стопор (на рис. 3.32 не показані).

Електромагніти 1 та 3 з'єднані шпилькою 9, при цьому шпилька 9 вкручена в тіло електромагніту 1, а електромагніт 3 має можливість пересуватися по шпильці 9 для регулювання сумарного повітряного проміжку між тяговими електромагнітами та якорем 5. Регулювання здійснюється гайкою, що розміщена в обоймі 10, яка жорстко з'єднана з електромагнітом 3 і на якій нанесено лімб для встановлення необхідної величини зазору (кроку переміщення).

Рухомою частиною є неферомагнітна напрямна – шток (наприклад, з нержавіючої сталі, бронзи тощо). У найпростішому випадку, коли робочий зазор (крок переміщення) не регулюється, на

штоку 11 виконані поперечні пази з відстанню між ними, яка дорівнює кроку переміщення, а ширина відповідає розміру стопору фіксаторів 6 та 8.

Для можливості регулювання кроку переміщення на напрямній-штоці виконуються декілька повздовжніх рядів ненаскрізнних отворів з кожною для свого ряду міжцентровою відстанню між отворами (кроком переміщення). Тоді для зміни кроку переміщення відповідний крок (зазор) встановлюється між електромагнітами 1, 3 та якорем 5, а напрямна 11 кріпиться до приводного механізму таким чином, щоб навпроти стопорів-фіксаторів 6, 8 був відповідний ряд отворів.

Двигун працює наступним чином. Нехай треба здійснити рух напрямної-штока вліво відносно закріплених тягових електромагнітів. В такому випадку електромагніт фіксатора 8 знеструмлений і його стопор входить в зачеплення з штоком 11, а живлення подається на електромагніт 1 та на електромагніт-фіксатор 6 (стопор фіксатора виходить з зачеплення зі штоком 11). Тоді якір 5 притягується до електромагніту 1 і переміщує шток 11 на величину повітряного зазору між електромагнітом та якорем.

Електромагнітна сила тяжіння визначається формулою:

$$Q = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S \quad (0.104)$$

де B_0 - магнітна індукція в повітряному зазорі;

μ_0 - магнітна стала;

S - сумарна площа полюсних наконечників циліндричного електромагніту.

Далі виключається електромагніт-фіксатор 6 і його стопор входить в зачеплення зі штоком 11, а електромагніт-фіксатор 6 підключається до джерела живлення з затримкою в часі і його стопор виходить з зачеплення зі штоком 11. Потім подається живлення на електромагніт 3 і якір 5 притягується до нього. Тепер фіксатор 8 знеструмлюється і система готова до нового кроку переміщення.

Друга конструкція крокового двигуна наведена на рис. 3.33 і принципово відрізняється тим, що обмотки електромагнітів-фіксаторів під час руху або фіксації знеструмлені.

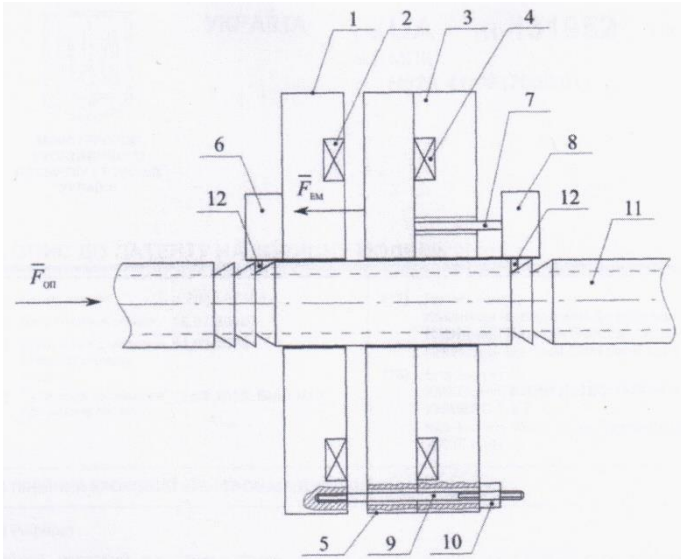


Рис. 3.33. Конструкція лінійного крокового електромагнітного двигуна.

Активна частина двигуна включає тяговий електромагніт 1 з обмоткою 2, тяговий електромагніт 3 з обмоткою 4, явір 5 та електромагніти-фіксатори 6 і 8. Фіксатор 6 жорстко зв'язаний з електромагнітом 1, а фіксатор 8 за допомогою штока 7 – з якорем 5. Кожен фіксатор включає свій магнітопровід, обмотку збудження, пружину, яка діє на рухомий стопор 12.

Електромагніти 1 та 3 з'єднані шпилькою 9, причому шпилька вкручена в тіло електромагніту 1, а електромагніт 3 має можливість пересуватись по шпильці 9 для регулювання сумарного повітряного проміжку зазору між тяговими електромагнітами та якорем 5.

Регулювання здійснюється гайкою, що розміщена в обоймі 10, яка жорстко з'єднана з електромагнітом 3 і на який нанесено лімб для встановлення необхідної величини зазору (кроку переміщення).

Рухомою частиною є напрямна-шток 11. Розмір паза пилоподібної форми в напрямку переміщення дорівнює кроку переміщення. Сумарний повітряний проміжок між електромагнітами 1,

3 та якорем 5 дорівнює кроку переміщення. Кут скосу паза напрямної-штоку і скосу стопорів 12 фіксаторів 6,8 однакові.

Двигун працює наступним чином. Його конструкція забезпечує тягове зусилля для переміщення штока вліво. Так, приподачі напруги на електромагніт 1 якір 5 притягується до нього і своїм стопором 12 фіксатора 8 переміщує шток 11 вліво на величину кроку переміщення. При цьому стопор 12 фіксатора 6, стискуючи пружину, піднімається ковзанням під дією пилоподібного паза, а після здійснення кроку переміщення заходить в заглиблення під дією пружини в новий паз, здійснюючи фіксацію штока. На кресленні показані напрями сили опору $F_{оп}$ та електромагнітної сили $F_{ем}$.

Далі вмикається обмотка електромагніту 3 і якір 5 притягується до нього. При цьому стопор 12 фіксатора 8 ковзає по похилій площині паза напрямної-штока, стискуючи пружину, а по завершенню кроку переміщення стопор фіксатора 8 входить в зачеплення з новим пазом штока. Далі процес повторюється. Тут головним є те, що підчас руху або фіксації електромагніти фіксаторів 6, 8 знеструмлені. Обмотки фіксаторів 6, 9 включаються тоді, коли треба повернути шток в початкове положення. Тоді стопори виходять із зачеплення зі штоком, а він повертається в початкове положення, наприклад під дією ваги з тросом. Прикладом такого приводу може бути повором за допомогою передачі рейка-шестерня панелі сонячної батареї, коли електромагніти-фіксатори вмикаються один раз після заходу сонця для повернення батареї в початкове положення, наприклад за допомогою противаги.

Для можливості регулювання кроку переміщення застосовано напрямну-шток з іншим кроком пилоподібних пазів та відповідним регулюванням відстані між тяговими електромагнітами.

3.10. Рекомендації до розрахунку крокового двигуна сонячного трекера

В запропонованих конструкціях за принципом дії використовується сила тяжіння між рухомою та нерухомою частиною:

$$Q = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0, \quad (0.105)$$

де B_0 – магнітна індукція в повітряному проміжку;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; S_0 – сумарна площа повітряного проміжку.

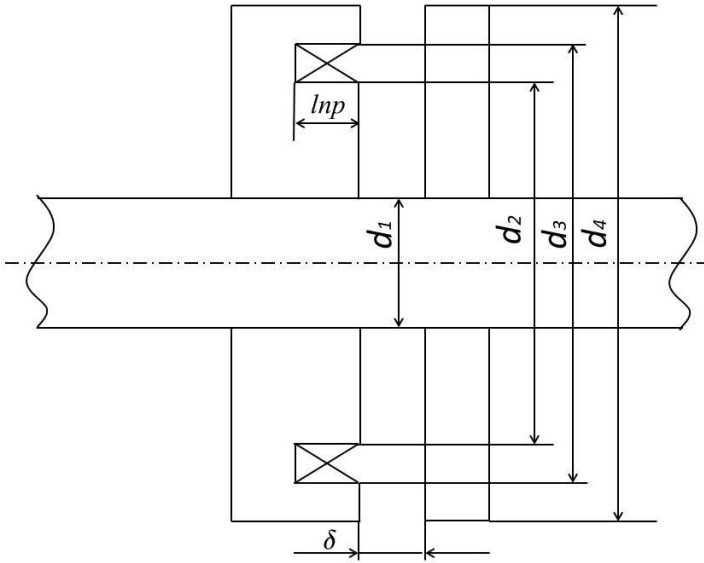


Рис. 3.34. Модель конструкції лінійного крокового електромагнітного двигуна для розрахунків

При немагнітному штовці:

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) + \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2)$$

Ця сила значно перевищує силу, яка в електричних машинах та апаратах визначається тангенціальною складовою.

$$\text{На одиницю площі } Q^* = \frac{B_0^2}{2\mu_0}.$$

$$\text{Так при } B_0 = 1 \text{ Тл } Q^* = \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2.$$

Вже при невеликих розмірах: $d_1 = 2$ см; $d_2 = 6$ см; $d_3 = 10$ см; $d_4 = 11,5$ см та при $B_0 = 0,8$ Тл маємо зусилля $Q = 1,28 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Для розрахунку крокового електромагнітного двигуна можна використати наступну послідовність:

1. Загадаємо необхідне тягове зусилля Q_H .

2. Зважаючи на те, що рух якоря починається після того, як електромагнітне зусилля Q_{em} перевищить зусилля опору Q_H , задаємо

$$Q_{em} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0 > Q_H \quad (0.106)$$

Далі задаємо B_0 і визначаємо S_0 , а після цього задаємо d_1 , d_2 , d_3 , d_4 з урахуванням того, що при однаковій індукції в повітряному проміжку $\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) = \frac{\pi}{4}(d_4^2 - d_3^2)$.

3. Необхідна магніторушійна сила обмотки:

$$F = I \cdot W = \frac{B_0 \cdot 2\delta}{\mu_0} \quad (0.107)$$

Якщо враховувати магнітний опір сталі, можна скористатися середнім значенням магнітної проникливості сталі і визначити приведену до повітряного проміжку довжину силової лінії в сталі l_{np} та додати її до 2δ .

Значення F визначає необхідну площу вікна під обмотку. Тобто при визначених розмірах d_2 та d_3 треба обрати розмір l_e . Слід врахувати, що згідно з рекомендацією [114] коефіцієнт заповнення площі ізолюваними провідниками $K_s = 0,68 \dots 0,74$.

4. Далі можна обрати діаметр ізолюваного провода і визначити кількість витків обмотки W .

5. До початку руху $\delta = const$, $L = const$ і струм змінюється за законом

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (0.108)$$

$$\text{де } \tau = \frac{L}{R}.$$

З цього рівняння час рушання:

$$t_p = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{I_p}{U/R}}, \quad (0.109)$$

де I_p – струм, при якому починається рух якоря.

Цей струм можна визначити з умови $Q_{em} = Q_H$ або

$$\frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0 = Q_H \rightarrow \frac{(I \cdot W \cdot \mu_0)^2 \cdot S_0}{(2\delta)^2 \cdot 2\mu_0} = Q_H \rightarrow I_p = \frac{2\delta}{W} \sqrt{\frac{2Q_H}{\mu_0 S_0}} \quad (0.110)$$

6. Знаючи кількість витків W , діаметр проводу та геометрію котушки, можна визначити активний опір та індуктивність обмотки, а, значить, і постійну часу τ .

7. У праці [114] в результаті аналізу отриманий вираз для часу пересування t_n якоря:

$$t_n = \sqrt{\frac{2m(\delta_0 + \delta_k)}{Q_H}}, \quad (0.111)$$

де m – маса рухомої частини; δ_0 – початкова величина повітряного проміжку; δ_k – кінцева величина повітряного проміжку (технологічний зазор).

Тоді загальний час спрацювання електромагніту

$$t_{cnp} = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{I_p}{U/R}} + \sqrt{\frac{2m(\delta_0 + \delta_r)}{Q_H}} \quad (0.112)$$

8. Якщо при визначеному опорі R та струмі I_p напруга живлення перевищує допустиму, то треба обрати більший діаметр проводу d_{np} , розрахувати кількість витків, опір обмотки, струм I_p та перевірити $U = I_p \cdot R$.

Наприклад, якщо збільшити d_{np} вдвічі, то кількість витків зменшиться у 4 рази (довжина проводу обмотки також зменшиться у 4 рази), а площа проводу збільшиться у 4 рази. Тому опір обмотки зменшиться в 16 разів, а струм I_p збільшиться в 4 рази. Тоді потрібна напруга зменшиться в 4 рази.

Енергія за один цикл роботи (за один крок):

1. Енергія за час t_p :

$$\begin{aligned}
W_p &= \int_0^{t_p} i^2 R dt = R \int_0^{t_p} \left[\frac{U}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \right]^2 dt = \frac{U^2}{R} \int_0^{t_p} (1 - 2e^{-t/\tau} + e^{-\frac{2t}{\tau}}) dt = \\
&= \frac{U^2}{R} (t_p - 2(-\tau)(e^{-t_p/\tau} - 1) + (-\frac{\tau}{2})(e^{-\frac{2t_p}{\tau}} - 1)) = \\
&= \frac{U^2}{R} \left[t_p + 2\tau e^{-\frac{t_p}{\tau}} - 2\tau - \frac{\tau}{2} e^{-\frac{2t_p}{\tau}} + \frac{\tau}{2} \right] = \frac{U^2}{R} \left[t_p - 1,5\tau + 2\tau e^{-\frac{t_p}{\tau}} - 0,5\tau e^{-\frac{2t_p}{\tau}} \right]
\end{aligned}$$

2. Енергія за час пересування t_{II} при умові, що $I = I_p = const$ (з урахуванням $t_{II} < t_p$):

$$W_{II} = I_p^2 R t_{II}.$$

3. Енергія за один крок:

$$W_{кр} = W_p + W_{II}.$$

При використанні крокового двигуна для повороту сонячної панелі, наприклад, через передачу рейка-шестерня, після кожного кроку обмотка знеструмлюється і енергія не витрачається.

3.11. Система електроживлення на основі сонячних фотоелектричних модулів

На основі результатів проведених досліджень авторами побудована структурна схема системи електроживлення на базі фотоелектричних модулів із відслідковуванням положення сонця та можливістю накопичення електричної енергії суперконденсаторами та акумуляторними батареями.

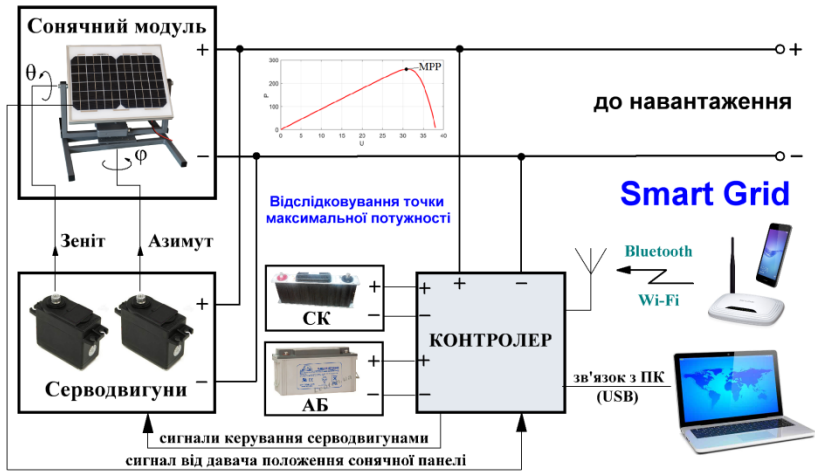


Рис. 3.35. Структурна схема системи електроживлення на основі фотоелектричних модулів

Розроблена система може підключатися до мережі Internet з використанням провідних та безпроводних технологій. Передбачена можливість інтеграції системи з ПК через порт USB для проведення додаткових налаштувань і вимірювань.

Навантаженням системи може бути мережевий інвертор. Таким чином, розроблена система електроживлення може бути ввімкнена в загальну електромережу $\sim 230\text{В}$, 50Гц ., що дозволить підвищити ефективність узгодження елементів мережі та реалізувати технології Smart Grid.



Рис. 3.36. Мережеві інвертори, які формують вихідну напругу $\sim 230\text{В}$, 50Гц .

Розроблений авторами лабораторний макет сонячного трекера зображений на рис.3.37.



Рис.3.37. Лабораторний макет сонячного трекера

Масштабований лабораторний макет сонячного трекера зображений на рис.3.39.

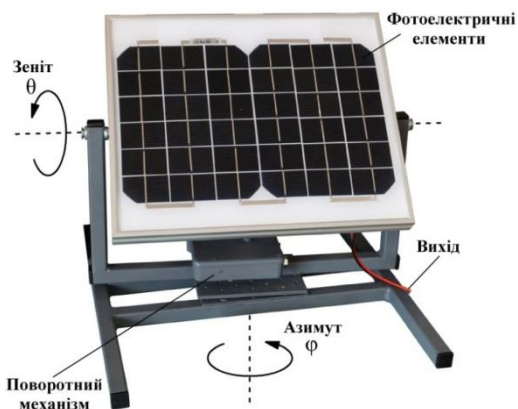


Рис.3.39. Масштабований макет сонячного трекера

Процес дослідження макетів сонячних трекерів у лабораторії сонячної енергетики ХНУ зображено на рис. 3.39.



Рис. 3.38. Дослідження макетів сонячних трекерів у лабораторії сонячної енергетики ХНУ.

ВИСНОВКИ

Відпрацьовано методику рідиннофазної епітаксії гетероструктур в системі GaAs-AlGaAs для створення фотоперетворювачів сонячної енергії. Досліджено процеси легування донорними та акцепторними домішками, епітаксійних шарів GaAs. Показано, що концентраційна залежність електронів в шарах GaAs, легованих Te в діапазоні від $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ ат%, має лінійний характер, а в шарах, легованих Sn, втрачає свій лінійний хід і починає прямувати до насичення при кількостях олова в розплаві, що перевищують $5 \cdot 10^{-2}$ ат%. Досліджено залежність концентрації дірок від кількості магнію та германію в шарах, отриманих із розплавів галію, комплексно легованих оптимальними кількостями ітербію та алюмінію. Встановлено, що отримані залежності є лінійними у всьому дослідженому діапазоні концентрацій.

Показано, що найбільш зручні з технологічної точки зору домішки Sn, Mg та Ge разом із комплексним легуванням розплавів галію ітербієм та алюмінієм, забезпечують в низькотемпературному варіанті РФЕ отримання епітаксійних шарів з концентраціями, які гарантують створення високоякісних оптоелектронних приладів. Встановлено природу фонових домішок в базових шарах n-GaAs та оцінено їх структурну досконалість за допомогою спектрів, отриманих методом низькотемпературної фотолюмінесценції (ФЛ).

Апробовані дві методики отримання градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs із насичених розчинів-розплавів галію, які базуються на додатковому примусовому імпульсному збільшенні швидкості охолодження технологічного середовища – насиченого розчину-розплаву галію, що контактує із підкладкою арсеніду галію, які відрізняються способом охолодження підкладки. Встановлено спосіб, що забезпечує формування оптимального профілю розподілу складу твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ де «x» змінюється від 0,2 до 0,32 на товщині ≈ 3 мкм. Показано, що модуляція швидкості зниження температури системи “підкладка-розплав”, що тотожно модуляції швидкості кристалізації, дозволяє формувати варізонні шари твердих розчинів $Al_xGa_{1-x}As$ в методі РФЕ через зміну коефіцієнта сегрегації алюмінію в галієвому розчині-розплаві.

Відпрацьовано методику формування варізонного шару твердого розчину із двох розчинів-розплавів кристалізація якого здійснюється поетапно спочатку за постійної швидкості зниження 0,5

°C/хв, а на другому етапі за модуляції швидкості зниження температури тобто додатковому різкому збільшенні швидкості зниження до (3–3,5) °C/хв, при подачі кожного із розчинів розплавів у ростовий зазор.

Оптимізовано технологічні режими легування цинком градієнтних шарів твердих розчинів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в складі гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Досліджено профілі розподілу концентрації носіїв заряду у варізонних епітаксійних структурах $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$.

Встановлено вплив ітербію на зародкоутворення в рідинофазній епітаксії галій та індій вміщуючих сполук AlB_5 , а також на формування квантових точок в системі GaAs/InAs , отриманих з використанням методу імпульсного охолодження насиченого розчину-розплаву. Показано, що основним чинником еволюції макрорельєфу поверхні епітаксійних шарів від характерного для РФЕ у виді терас через рельєф – “апельсинова шкірка” до утворення дефектів на поверхні у виді ямок різної форми, є екранування частини центрів кристалізації на поверхні підкладки атомами ітербію, які знаходяться в моноатомному шарі на фронті кристалізації.

Відпрацьовано технологію формування варізонних шарів AlGaAs із вбудованими нанорозмірними об'єктами (квантовими точками InAs). Формування масиву квантових точок базується на імпульсному контрольованому охолодженні насиченого розчину – розплаву In-As , що контактує із арсенід галієвою підкладкою. Вибором оптимальної температури росту і величини пересичення розчину-розплаву досягається можливість кристалізації масиву квантових точок без спейсерного (закорочуючого) шару. Особливістю запропонованої технології є суміщення в єдиному технологічному процесі кристалізації квантових точок та варізонного шару твердого розчину AlGaAs .

Виготовлено експериментальні зразки фотоелектричних перетворювачів на основі гетероструктур $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ з варізонним шаром $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x змінюється по товщині шару від 0 до 0,3 на поверхні), які характеризуються підвищеним значенням ККД=26 % виміряним за атмосферних умов $\text{AM}1,5$.

Максимального значення ККД СЕ (більше 28%) вдалося досягнути в структурах із впровадженими КТ у варізонний активний шар завдяки розширенні спектру сонячного випромінювання у ближню інфрачервону область.

В процесі досліджень електричних кіл перетворювачів виконано аналіз методів збільшення відбору енергії від джерела струму з нелінійними паразитними елементами. Як результат, отримано оцінку диференційного опору для сонячного модуля який є джерелом постійного струму з нелінійними паразитними елементами.

Розроблено нову математичну модель для визначення параметрів режиму точки максимальної потужності нелінійного джерела струму, утвореного сонячним модулем. Запропонована математична модель відрізняється від відомих урахуванням параметрів еквівалентного внутрішнього джерела струму сонячного модуля. Модель дозволяє розробляти методи відстежування ТМП з урахуванням вимірних значень температури і освітленості сонячних модулів.

Виконано експериментальне дослідження точки максимальної потужності (ТМП) для сонячного модуля. Режим ТМП підтримується інвертуючим перетворювачем з коефіцієнтом заповнення, який визначається з запропонованої моделі. Проведені експерименти показують, що запропонована модель забезпечує значення коефіцієнта заповнення інвертуючого перетворювача, які практично відповідають значенням, отриманим експериментально в режимі ТМП. Максимальна відносна похибка між теоретичними і експериментальними значеннями становить менше 1,7%.

На основі отриманих наукових результатів побудовано систему електроживлення з відслідковуванням положення сонця та з можливістю накопичення енергії суперконденсаторами та акумуляторами. За рахунок науково-прикладних рішень, що базуються на відслідковуванні максимуму сонячного випромінювання та точки максимальної потужності фотоелектричного модуля, розроблена система електроживлення дозволяє отримати суттєве підвищення ефективності відбору енергії від фотоелектричних модулів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Tiwari GN, Shyam AT. Handbook of Solar Energy.Theory, Analysis and Applications. Springer; 2016.
- [2] Subudhi B, Pradhan R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. IEEE Trans Sustain Energy 2013;4:89–98. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294>.
- [3] Zhang Q, Hu C, Chen L, Amirahmadi A, Kutkut N, Shen ZJ, et al. A center point iteration MPPT Method with application on the frequency-modulated LLC microinverter. IEEE Trans Power Electron 2014;29:1262–74. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2262806>.
- [4] Roy CP, Naick BK, Shankar G. Comparative Study of Photovoltaic MPPT Algorithms. Int J Recent Trends Eng Technol 2014;11:191–201.
- [5] Zhang F, Thanapalan K, Procter A, Carr S, Maddy J. Adaptive hybrid maximum power point tracking method for a photovoltaic system. IEEE Trans Energy Convers 2013;28:353–60. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2255292>.
- [6] Bazzi AM, Krein PT. Ripple correlation control: An extremum seeking control perspective for real-time optimization. IEEE Trans Power Electron 2014;29:988–95. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256467>.
- [7] Chafle SR, Vaidya UB. Incremental Conductance MPPT Technique FOR PV System. Int J Adv Res Electr Electron Instrum Eng 2013;2:2719–26.
- [8] Luo FL. Advanced Dc / Dc Converters. 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203492925>.
- [9] Abu-Aisheh AA, Batarseh MG. DC-DC converters. Electr. Renew. Energy Syst., 2015, p. 337–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804448-3.00015-3>.
- [10] Singh G, Ponnaganti R, Prabhakar T V, Vinoy KJ. A tuned rectifier for RF energy harvesting from ambient radiations. AEU - Int J Electron Commun 2013;67:564–9. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2012.12.004>.
- [11] Rashid MH, Abu-aisheh AA, Batarseh MG. 15 – DC–DC converters. Electr. Renew. Energy Syst., 2016, p. 337–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804448-3.00015-3>.
- [12] Orellana M, Petibon S, Estibals B, Alonso C. Four Switch Buck-Boost Converter for Photovoltaic DC-DC Power Applications.

- Converter 2010:469–74.
- [13] Utkin V. Sliding mode control of DC/DC converters. *J Franklin Inst* 2013;350:2146–65. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2013.02.026>.
- [14] Degrenne N, Allard B, Buret F, Morel F, Adami S, Labrousse D, et al. Comparison of 3 Self-Starting Step-Up DC : DC Converter Topologies for Harvesting Energy from Low-Voltage and Low-Power Microbial Fuel Cells Keywords. *Converter* 2011:1–10.
- [15] Kurokawa F, Nakashima T, Tanaka K, Okamoto W. A New Fast Digitally Controlled DC-DC Converter. *Converter* 2007:798–802. <https://doi.org/10.1109/PESC.2007.4342090>.
- [16] Furukawa Y, Kurokawa F, Colak I. Digital PID based two-compensator for DC-DC converter. *INTELEC, Int. Telecommun. Energy Conf.*, vol. 2016- Septe, 2016. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2015.7572339>.
- [17] Fathah A. Design of a Boost Converter. Fathah, A (2013) Des a Boost Convert 2 Retrieved from <Http://EthesisNitrkIAc.in/4811/1/109EE0612Pdf> 2013:2.
- [18] Xu JXJ. An analytical technique for the analysis of switching DC-DC converters. 1991 *IEEE Int Sympoisum Circuits Syst* 1991:1212–5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.1991.176586>.
- [19] Mahajan SB, Sanjeevikumar P, Pandav KM, Kulkarni RM, Sherke VA. Buck-Boost current converter using duality concept and its DC transformer modelling. *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 436, 2017, p. 315–24. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4394-9_32.
- [20] Alzahrani A, Shamsi P, Ferdowsi M, Dagli C. Chaotic behavior of DC-DC converters. 2017 6th *Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA* 2017, vol. 2017- Janua, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191210>.
- [21] Ashraf M, Masoumi N. High efficiency boost converter with variable output voltage using a self-reference comparator. *AEU - Int J Electron Commun* 2014;68:1058–64. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.05.011>.
- [22] Magaldi GL, Serra FM, Silva LI. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic system. 2015 16th *Work. Inf. Process. Control. RPIC* 2015, 2016. <https://doi.org/10.1109/RPIC.2015.7497119>.
- [23] Eltamaly AM, Farh HM. Smart maximum power extraction for wind energy systems. *Int. Conf. Smart Energy Grid Eng. SEGE* 2015, 2015. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2015.7324623>.
- [24] Shi C, Miller B, Mayaram K, Fiez T. A multiple-input boost converter for low-power energy harvesting. *IEEE Trans Circuits*

- Syst II Express Briefs 2011;58:827–31.
<https://doi.org/10.1109/TCSII.2011.2173974>.
- [25] Forouzesh M, Siwakoti YP, Gorji SA, Blaabjerg F, Lehman B. Step-Up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Trans Power Electron* 2017;32:9143–78.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>.
- [26] Davoudi A, Jatskevich J. Parasitics realization in state-space average-value modeling of PWM dc-dc converters using an equal area method. *IEEE Trans Circuits Syst I Regul Pap* 2007;54:1960–7. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2007.904686>.
- [27] Li S, Attou A, Yang Y, Geng D. A maximum power point tracking control strategy with variable weather parameters for photovoltaic systems with DC bus. *Renew Energy* 2015;74:478–88.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.056>.
- [28] Rashid MH, editor. *Advanced DC/DC Converters*. Second Edition. 2017.
- [29] Asadi F, Eguchi K. *Dynamics and Control of DC-DC Converters*. vol. 6. 2018.
<https://doi.org/10.2200/S00828ED1V01Y201802PEL010>.
- [30] Nidhi N, Prasad D, Nath V. Different aspects of smart grid: An overview. *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 511, 2019, p. 451–6.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-0776-8_41.
- [31] Marodkar M, Adhau S, Sabley M, Adhau P. Design and simulation of DC-DC converters for Photovoltaic system based on MATLAB. *2015 Int. Conf. Ind. Instrum. Control. ICIC 2015*, 2015, p. 1478–83.
<https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150983>.
- [32] Yang N, Wu C, Jia R, Liu C. Modeling and characteristics analysis for a buck-boost converter in pseudo-continuous conduction mode based on fractional calculus. *Math Probl Eng* 2016;2016.
<https://doi.org/10.1155/2016/6835910>.
- [33] Ramu G, Nagesh Kumar G V, Dharma Raj CH. Performance analysis of boost fed Dc drive under load uncertainties. *Indian J Sci Technol* 2016;9:1–11.
<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/103878>.
- [34] Arjun M, Patil V. Steady state and averaged state space modelling of non-ideal boost converter. *Int J Power Electron* 2015;7.
<https://doi.org/10.1504/IJPELEC.2015.071204>.
- [35] Martynyuk VV, Kosenkov VD, Fedula MV. The Improvement of Energy Harvesting Efficiency of Constant Current Source. *Probl Energ Reg* 2019:74–83.

- [36] Martynyuk VV, Kosenkov VD, Geydarova OV, Fedula MV. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia* 2019:17–29.
- [37] Lopa SA, Hossain S, Hasan MK, Chakraborty TK. Design and Simulation of DC-DC Converters. *Int Res J Eng Technol* 2016:2395–56.
- [38] Liu M. Switched-Capacitor DC-DC Converters. *Demystifying Switch. Capacit. Circuits*, 2007, p. 223–45. <https://doi.org/10.1016/b978-075067907-7/50018-2>.
- [39] Abdulslam A, Amer SH, Emara AS, Ismail Y. Evaluation of multi-level buck converters for low-power applications. *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, vol. 2016- July, 2016, p. 794–7. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7527360>.
- [40] Muntean N, Cornea O, Pelan O, Lascu C. Comparative evaluation of buck and hybrid buck DC-DC converters for automotive applications. *15th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo. EPE-PEMC 2012 ECCE Eur.*, 2012. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397272>.
- [41] Martynyuk V, Kosenkov VD, Fedula M V., Makaryshkin DA, Kovtun LO. Method of load resistance energy increase in the electric circuit with constant electromotive force. *Proc. 2017 IEEE 9th Int. Conf. Intell. Data Acquis. Adv. Comput. Syst. Technol. Appl. IDAACS 2017*, vol. 1, 2017, p. 243–6. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095084>.
- [42] Khan FH. *Modular DC-DC converters*. ProQuest Diss Theses 2007.
- [43] Winder S. *Boost Converters. Power Supplies LED Drivers*, 2008, p. 61–98. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8341-8.00006-2>.
- [44] Beltrame F, Dupont FH, Sartori HC, Roggia L, Cancian EC, Pinheiro JR. Different optimum designs investigation of DC/DC boost converter applied to the photovoltaic system. *2013 Brazilian Power Electron. Conf. COBEP 2013 - Proc.*, 2013, p. 538–43. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2013.6785167>.
- [45] Krukovsky SI, Popov VM, Savkina RK, Smirnov AB. Effect of rare earth addition on GaAs-based layers grown by liquid phase epitaxy. *Eur Phys J Appl Phys* 2004;27:177–9. <https://doi.org/10.1051/epjap:2004135>.
- [46] Pérez Taborda JA, Caicedo JC, Grisales M, Saldarriaga W, Riascos H. Deposition pressure effect on chemical, morphological and optical properties of binary Al-nitrides. *Opt Laser Technol* 2015;69:92–103. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.009>.

- [47] How MOCVD works. Deposition Technology for Beginners, Aixtron, May 2011 n.d.
- [48] Bolkhovityanov YB. The peculiarities of isothermal contact of liquid and solid phase during the LPE of A3B5 compounds. *J Cryst Growth* 1981;55:591–8. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(81\)90118-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(81)90118-4).
- [49] Gorelenok AT, Kamanin A V., Shmidt NM. Rare-earth elements in the technology of III–V compounds and devices based on these compounds. *Semiconductors* 2003;37:894–914. <https://doi.org/10.1134/1.1601656>.
- [50] Марончук ИЕ, Марончук АИ, Шорохов АВ. Наноразмерные слои GaAs, полученные при импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава. *Письма в ЖТФ* 1997;23:82–6.
- [51] Марончук ИЕ. Получение низкоразмерных структур методом импульсного охлаждения раствора-расплава. *Известия Вузов Северо-Кавказский Регион Технические Науки* 2002;22–30.
- [52] Марончук ИЕ, Марончук АИ, Кулюткина ТФ, Найденов МВ, И.В. Ч. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава. *Поверхность, Рентгеновские, Синхротронные и Нейтронные Исследования* 2005:95–9.
- [53] Романенко ВН, Хейфец ВС. Коэффициенты распределения и кривые растворимости некоторых редкоземельных элементов в GaAs. *Неорганические Материалы* 1973;9:190–7.
- [54] Мастеров ВФ, Захаренков ЛФ. Редкоземельные элементы в полупроводниках A3B5. *ФТП* 1990;21:610–30.
- [55] E.F. V, G.N. S, T.G. K, M.P. S, S.I. K, B. P. The use double doping for preparation of GaAs, AlGaAs epilayers by liquid phase epitaxy. *tenth Int. Conf. Var. growth Ep.*, 1998, p. 331.
- [56] S.I. K, O. M, D.M. Z. Peculiarities of p-AlGaAs:Mg epitaxial layers grown by low temperature liquid-phase epitaxy method for DH lasers. *Int. Conf. “Crystal Mater. 2005,”* 2005, p. 221.
- [57] Вакив НМ, Завербный ИР, Заячук ДМ, С.И. К, Мрыхин ИО. Установка для определения профилей распределения свободных носителей заряда по глубине эпитаксиальных структур GaAs. *Технология и Конструирование в Электронной Аппаратуре* 2005:40–5.
- [58] Andreev VM, Khvostikov VP, Larionov VR, Rumyantsev VD, Paleeva E V., Shvarts MZ. High-efficiency AlGaAs/GaAs concentrator (2500 suns) solar cells. *Semiconductors* 1999;33:976–7. <https://doi.org/10.1134/1.1187816>.

- [59] Green MA, Hishikawa Y, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Ho-Baillie AWY. Solar cell efficiency tables (version 51). *Prog Photovoltaics Res Appl* 2018;26:3–12. <https://doi.org/10.1002/ppp.2978>.
- [60] Darbandi A, Watkins SP. Measurement of minority carrier diffusion lengths in GaAs nanowires by a nanoprobe technique. *J Appl Phys* 2016;120:014301. <https://doi.org/10.1063/1.4955136>.
- [61] Алфёров ЖИ, Андреев ВМ, Аксенов ВЮ, Ларионов ВР, Мокина ИА, Румянцев ВДХВП. Низкопороговые ($I_n = 6.2$ мА, $T = 300$ К) полосковые квантоворазмерные AlGaAs-гетеролазеры, полученные методом низкотемпературной ЖФЭ. *Письма в Журнал Технической Физики* 1988;15:37.
- [62] Pavesi L, Guzzi M. Photoluminescence of Al x Ga $1-x$ As alloys. *J Appl Phys* 1994;75:4779–842. <https://doi.org/10.1063/1.355769>.
- [63] Dmitruk NL, Borkovskaya OY, Mamykin S V. Measurement of the diffusion length of minority charge carriers using real Schottky barriers. *Semiconductors* 1997;31:661–5. <https://doi.org/10.1134/1.1187060>.
- [64] Бельный ВЗ. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации. Феноменологический подход. Наука. Москва: 1980.
- [65] Трофимов ВИ, Осадченко ВА. Рост и морфология тонких пленок. Энергоатом. Москва: 1993.
- [66] Хвостиков ВП. Низкотемпературная жидкофазная эпитаксия АПВ – наногетероструктур и оптоэлектронных приборов на их основе. Автореф. Дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10 / Физико-техн.ин-т. им. А.Ф. Иоффе. – С.-Петербург, 2003.
- [67] Asryan L V., Suris RA. Theory of threshold characteristics of semiconductor quantum dot lasers. *Semiconductors* 2004;38:1–22. <https://doi.org/10.1134/1.1641126>.
- [68] Кулоткина ТФ, Марончук АИ, Шорохов АВ. Выращивание субмикронных слоев при импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава. *Письма в ЖТФ* 1995;21:1.
- [69] Дубровский ВГ, Сибирев НВ, Цырлин ГЭ, В.М. У. Теория формирования многослойных тонких пленок на поверхности твердого тела. *ФТП* 2006;40:257.
- [70] Dubrovskii VG. Growth Kinetics of Thin Films Formed by Nucleation during Layer Formation. *Semiconductors* 2005;39:1267. <https://doi.org/10.1134/1.2128448>.
- [71] Dubrovskii VG, Koryakin AA, Sibirev NV. Understanding the composition of ternary III-V nanowires and axial nanowire

- heterostructures in nucleation-limited regime. *Mater Des* 2017;132:400–8. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.012>.
- [72] Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. Энергоатом. Москва: 1983.
- [73] Wu X, Liu H, Li H, Li Q, Hu S, Xi Z, et al. Fabrication of 150-nm Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As mHEMTs on GaAs substrates. *Sci China Physics, Mech Astron* 2012;55:2389–91. <https://doi.org/10.1007/s11433-012-4910-7>.
- [74] US Pat."Photoelectrochemical etching of semiconductors" Pub.Date: 1981-01-08 n.d.
- [75] Paccagnella A, Wang LC, Canali C, Castellaneta G, Dapor M, Donzelli G, et al. Pd/Ge ohmic contacts for GaAs metal-semiconductor field effect transistors: Technology and performance. *Thin Solid Films* 1990;187:9–18. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(90\)90105-M](https://doi.org/10.1016/0040-6090(90)90105-M).
- [76] Liu Z, Ren Z, Liu H, Sahraei N, Lin F, Stangl R, et al. A modeling framework for optimizing current density in four-terminal tandem solar cells: A case study on GaAs/Si tandem. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2017;170:167–77. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.048>.
- [77] Каргин НИ, Кузнецов АЛ, Сейдман ЛА, Чашкин НА, Шостаченко СА. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия. *Электронная Техника Серия 2 Полупроводниковые Приборы* 2014;75–84.
- [78] Круковський СІ. Комплексно леговані епітаксійні структури на основі АЗВ5. Рукопис дисертації. 2006:281.
- [79] Kosten ED, Atwater JH, Parsons J, Polman A, Atwater HA. Highly efficient GaAs solar cells by limiting light emission angle. *Light Sci Appl* 2013;2:e45–e45. <https://doi.org/10.1038/lsa.2013.1>.
- [80] Fonash SJ, Ashok S, Fonash RT. *Solar cell. ELECTRONIC*. London: 2017.
- [81] Chen X, Chen Y, Zhang B, Qiu D. A Modeling and Analysis Method for Fractional-Order DC-DC Converters. *IEEE Trans Power Electron* 2017;32:7034–44. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2628783>.
- [82] Wang F-Q, Ma X-K. Fractional order modeling and simulation analysis of Boost converter in continuous conduction mode operation. *Wuli Xuebao/Acta Phys Sin* 2011;60.
- [83] Martynyuk V, Ortigueira M, Fedula M, Savenko O. Methodology of

- electrochemical capacitor quality control with fractional order model. *AEU - Int J Electron Commun* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.05.005>.
- [84] Conway BE. *Electrochemical Supercapacitors Scientific Fundamentals and Technological Applications*. *J Chem Inf Model* 2013;53:1689–99. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [85] Fletcher S, Black VJ, Kirkpatrick I. A universal equivalent circuit for carbon-based supercapacitors. *J Solid State Electrochem* 2014;18:1377–87. <https://doi.org/10.1007/s10008-013-2328-4>.
- [86] Ozoemena KI, Shaowei C. *Nanomaterials in Advanced Batteries and Supercapacitors*. Springer; 2016.
- [87] Itagaki M, Hatada Y, Shitanda I, Watanabe K. Complex impedance spectra of porous electrode with fractal structure. *Electrochim Acta* 2010;55:6255–62. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.10.016>.
- [88] Barsoukov E. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. *Impedance Spectrosc Theory, Exp Appl* 2005:1–595. <https://doi.org/10.1002/0471716243>.
- [89] Magin RL. Fractional calculus in bioengineering: A tool to model complex dynamics. *Proc. 2012 13th Int. Carpathian Control Conf. ICC* 2012, 2012, p. 464–9. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2012.6228688>.
- [90] Machado JAT. And i say to myself: What a fractional world! *Fract Calc Appl Anal* 2011;14:635–54. <https://doi.org/10.2478/s13540-011-0037-1>.
- [91] Ortigueira MD. *Fractional Calculus for Scientists and Engineers*. vol. 84. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0747-4>.
- [92] Radwan AG. Resonance and quality factor of the $RL\alpha C\alpha$ fractional circuit. *IEEE J Emerg Sel Top Circuits Syst* 2013;3:377–85. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2272838>.
- [93] Ortigueira MD, Rivero M, Trujillo JJ. From a generalised Helmholtz decomposition theorem to fractional Maxwell equations. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul* 2015;22:1036–49. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.09.004>.
- [94] Kumar MR, Ghosh S, Das S. Charge-discharge energy efficiency analysis of ultracapacitor with fractional-order dynamics using hybrid optimization and its experimental validation. *AEU-International J Electron Commun* 2017;78:274–80. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.05.011>.
- [95] Martynuk V. *Supercapacitor Data Acquisition Systems*. 4-th IEEE Work. *Intell. Data Acquis. Comput. Syst. Technol. Appl.*,

- Dortmund, Germany: 2007, p. 24–28.
- [96] Yoon S, Jang JH, Ka BH, Oh SM. Complex capacitance analysis on rate capability of electric-double layer capacitor (EDLC) electrodes of different thickness. *Electrochim Acta* 2005;50:2255–62. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.10.009>.
- [97] Vastarouchas C, Tsimirakou G, Psychalinos C. Extraction of Cole-Cole model parameters through low-frequency measurements. *AEU - Int J Electron Commun* 2018;84:355–9. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.11.020>.
- [98] Allagui A, Freeborn TJ, Elwakil AS, Maundy BJ. Reevaluation of Performance of Electric Double-layer Capacitors from Constant-current Charge/Discharge and Cyclic Voltammetry. *Sci Rep* 2016;6. <https://doi.org/10.1038/srep38568>.
- [99] Jesus IS, Tenreiro MacHado JA. Application of integer and fractional models in electrochemical systems. *Math Probl Eng* 2012;2012. <https://doi.org/10.1155/2012/248175>.
- [100] AboBakr A, Said LA, Madian AH, Elwakil AS, Radwan AG. Experimental comparison of integer/fractional-order electrical models of plant. *AEU - Int J Electron Commun* 2017;80:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.06.010>.
- [101] Ortigueira MD, Machado JAT. Which Derivative? *Fractal Fract* 2017;1:3.
- [102] Freeborn TJ, Maundy B, Elwakil AS. Fractional-order models of supercapacitors, batteries and fuel cells: A survey. *Mater Renew Sustain Energy* 2015;4. <https://doi.org/10.1007/s40243-015-0052-y>.
- [103] Martynyuk V, Ortigueira M. Fractional model of an electrochemical capacitor. *Signal Processing* 2015;107:355–60. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.02.021>.
- [104] Monje CA, Chen Y, Vinagre BM, Xue D, Feliu-Batlle V. Fundamentals of Fractional-order Systems. *Fractional-order Syst. Control. Fundam. Appl.*, 2010, p. 9–35.
- [105] Biswas K, Bohannan G, Caponetto R, Lopes AM, Machado JAT. *Fractional-Order Devices*. Springer; 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54460-1>.
- [106] De Santis V, Martynyuk V, Lampasi A, Fedula M, Ortigueira MD. Fractional-order circuit models of the human body impedance for compliance tests against contact currents. *AEU - Int J Electron Commun* 2017;78:238–44. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.04.035>.
- [107] Das S. Functional fractional calculus for system identification and controls. 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72703-3>.

- [108] Tsirimokou G, Psychalinos C, Elwakil A. Design of CMOS Analog Integrated Fractional-Order Circuits: Applications in Medicine and Biology. Springer; 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55633-8>.
- [109] АС СРСР №411581, МПК Н02К 41/02, 1974.
- [110] АС СРСР №420058, МПК Н02К 41/02, 1974.
- [111] Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М: Энергия; 1980.
- [112] Патент України №421161А, МПК Н02К 41/02, 2001.
- [113] Косенков ВД, Скубій ЛВ. Лінійний кроковий електродвигун. Вимірювальна Та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах 2004.
- [114] Косенков ВД, Скубій ЛВ. До визначення часу спрацювання електромагнітів крокового двигуна. Вимірювальна Та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах 2002.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ ВІД ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ	6
1.1. <i>Втрати енергії у сонячних фотоелектричних системах</i>	<i>6</i>
1.2. <i>Аналіз засобів зниження втрат енергії фотоелектричних модулів.....</i>	<i>8</i>
1.3. <i>Імпульсні перетворювачі</i>	<i>10</i>
1.3.1. <i>Імпульсні перетворювачі з пониженням напруги.....</i>	<i>11</i>
1.3.2. <i>Імпульсні перетворювачі з підвищенням напруги.....</i>	<i>15</i>
1.4. <i>Особливості узгодження схем з нелінійними паразитними елементами.....</i>	<i>18</i>
2. ПЛІВКИ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ AlGaAs ЯК ОСНОВА СУЧАСНИХ ВАРІЗОННИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	20
2.1. <i>Відпрацювання оптимальних режимів кристалізації буферних плівок n-GaAs та p+-GaAs.</i>	<i>21</i>
2.1.1. <i>Відпрацювання оптимальних режимів кристалізації буферних плівок n-GaAs та p+-GaAs</i>	<i>21</i>
2.1.2. <i>Оцінка оптимальних градієнтів ширини забороненої зони плівок твердого розчину AlGaAs.....</i>	<i>26</i>
2.2. <i>Апробація методики та вибір технологічних режимів отримання градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs із насичених розчинів-розплавів галію за модульованого зниження температури кристалізації</i>	<i>31</i>
2.2.1. <i>Відпрацювання технології формування градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs за модульованого зниження температури кристалізації.....</i>	<i>31</i>
2.2.2. <i>Кристалізація градієнтних епітаксійних шарів твердого розчину AlGaAs за модульованого зниження температури.....</i>	<i>35</i>
2.3. <i>Виготовлення варізонних епітаксійних гетероструктур AlGaAs \ GaAs. Відпрацювання базових фізико-хімічних аспектів формування властивостей гетеросистем AlGaAs \ GaAs з нанорозмірними об'єктами.....</i>	<i>39</i>

2.3.1. Виготовлення варізонних епітаксійних гетероструктур AlGaAs \ GaAs	39
2.3.2. Дослідження профілю розподілу концентрації носіїв заряду у варізонних епітаксійних структурах AlGaAs / GaAs	40
2.3.3. Відпрацювання базових фізико-хімічних аспектів формування властивостей гетеросистем AlGaAs / GaAs з нанорозмірними об'єктами	44
2.3.4. Отримання варізонних гетероструктур n-AlGaAs-p-AlGaAs-r+AlGaAs з впровадженними нанорозмірними об'єктами	50
<i>2.4. Виготовлення фотоелектричних перетворювачів на основі варізонних епітаксійних структур GaAs/AlGaAs</i>	<i>57</i>
2.4.1. Вибір матеріалу контактів та просвітлюючого покриття до фотоелектричного перетворювача	58
2.4.2. Відпрацювання технологічного режиму нанесення металізованого покриття на фотоелементи	60
2.4.3. Оптимізація технології нанесення просвітлюючого покриття.....	63
2.4.4. Спектральна чутливість і вольт-амперна характеристика фотоелектричного перетворювача	64
<i>2.5. Вимірювання основних параметрів фотоелектричних перетворювачів</i>	<i>67</i>
2.5.1. Методика дослідження CE AlGaAs / GaAs.....	67
2.5.2. Методика досліджень сонячних модулів.....	72
3. ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ.....	75
<i>3.1. Підвищуючий імпульсний перетворювач.....</i>	<i>75</i>
<i>3.2. Аналіз параметрів та режимів імпульсного перетворювача ..</i>	<i>79</i>
<i>3.3. Аналіз ефективності імпульсного перетворювача при різних формах перехідного процесу</i>	<i>84</i>
<i>3.4. Результати експериментального дослідження імпульсного перетворювача з підвищенням напруги.</i>	<i>86</i>
3.4.1. Параметри досліджуваного перетворювача	87
3.4.2. Процеси передачі енергії.....	88
3.4.3. Перехідний процес при включенні перетворювача	91

3.4.4. Аналіз ефективності експериментального зразка імпульсного перетворювача	92
3.5. Оцінка умов узгодження навантаження сонячного модуля...	95
3.6. Реалізація режиму точки максимальної потужності сонячного модуля.....	98
3.7. Електрохімічний конденсатор як накопичувач енергії сонячної фотоелектричної системи	104
3.8. Методологія контролю параметрів ЕК на основі моделей дробового порядку.....	109
3.9. Розробка нових типів електроприводів повороту сонячної панелі.....	113
3.10. Рекомендації до розрахунку крокового двигуна сонячного трекара	119
3.11. Система електроживлення на основі сонячних фотоелектричних модулів	123
ВИСНОВКИ.....	127
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	130