Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

КАСКАДНІ ФОТОПРИЙМАЧІ З НАНОСТРУКТУРАМИ

(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МНПм – 18 – 1
Пугачов І.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро - та наноелектронні прилади і пристрої»

Керівник доц. Пащенко О.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Бондаренко І.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри

_____І.М.Бондаренко

«____»_____2019р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пугачу Іллі Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *КАСКАДНІ ФОТОПРИЙМАЧІ З НАНОСТРУКТУРАМИ*
«Каскадні фотоприймачі з наноструктрами»
затверджена наказом по університету від "_04_" ___11__2019 року №_1636Ст___
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи _____
- активна область фотоприймача у вигляді шістнадцятишарової КРС на основі гетероструктури $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ _
- вміст алюмінію x = 0,1 – 0,4;
-напруженість внутрішнього електричного поля E0=0,5 В/м.

_____
_____
_____
_____
_____
_____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі_____
1. Огляд оптичних властивостей наноструктур;

2. Умови оптичного поглинання у напівпровідниках;
3. Основні параметри наноструктур, які впливають на оптичні властивості;
4. Методи математичного описання спектру оптичного коефіцієнта поглинаня.

_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
Презентація (слайди) 14 аркушів

_____
_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на атестаційну роботу	4.11.2019	
2	Огляд інформаційних джерел за темою	5.11 – 15.11	
	роботи		
3	Вибір та обґрунтування методу дослідження	16.11 – 30.11	
4	Складання і опрацювання математичної	01.12 – 05.12	
	моделі досліджуваних процесів		
5	Опрацювання результатів дослідження та	06.12 – 13.12	
	оформлення пояснювальної записки		
6	Подання роботи на кафедру	16.12.2019	

Дата видачі завдання_____

Студент _____Пугачов Ілля Ігорович
(підпис)

Керівник роботи _____ _____ доц. Пащенко О.Г.
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 52 с., 17 рис., 36 джерел, 2 додатки.

ФОТОДІОД, ТУНЕЛЮВАННЯ, НАДГРАТКА, МОЛЯРНА ЧАСТКА, ПРОЗОРІСТЬ, ЕЛЕКТРОН, ЗОВНІШНЄ ПОЛЕ, ГЕТЕРОПЕРЕХІД, ПОТЕНЦІЙНИЙ БАР'ЄР.

Об'єкт дослідження – активний шар лавинного фотодіода у вигляді шістнадцяти шарової надгратки на основі гетероструктур $GaAs/Al_{X_i}Ga_{1-X_i}As$.

Мета роботи – дослідження впливу інженерних параметрів активної області лавинних фотодіодів на прозорість структури в цілому.

Метод дослідження – модулювання на основі математичного апарату квантової механіки. Математичне моделювання проводилось з використанням математичного пакету Mathcad.

Проведено дослідження прозорості структури активного шару лавинного фотодіода за відсутності зовнішнього електричного зміщення та під впливом зовнішнього поля.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 52 pages, 17 figures, 36 sources, 2 supplements.

PHOTODIOD, TUNNELING, UPGRADES, PRAYER PART, TRANSPARENCY, ELECTRONIC, EXTERNAL FIELD, HETEROPERHEAD, POTENTIAL BARRIER.

The object of study is an active layer of an avalanche photodiode in the form of a sixteen-layer superlattice based on GaAs / AlXiGa1-XiAs heterostructures.

The purpose of the work is to study the influence of engineering parameters on active and avalanche photodiodes on the transparency of the structure as a whole.

Method of research - modulation on the basis of mathematical apparatus of quantum mechanics. Mathematical modeling was performed using the Mathcad mathematical package.

The transparency of the structure of the active layer of an avalanche photodiode in the absence of external electric displacement and under the influence of an external field was investigated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....7
ВСТУП 8
1 ГЕТЕРОСТРУКТУРНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ З'ЄДНАНЬ AIIIBV 9
1.1 Переваги та недоліки гетероперехідних сонячних елементів.....9
1.2 Гетероструктурні сонячні елементи на основі сполук AIIIBV 13
2 КАСКАДНІ ФОТОПРИЙМАЧІ З НАНОСТРУКТРАМИ.....25
2.1. Формування енергетичної діаграми активної області фотоприймача 25
2.2 Прозорість надгратки в стаціонарному стані і під дією поля об′ємного заряду 37
ВИСНОВКИ.....48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 49
ДОДАТОК А.....53
ДОДАТОК Б 54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГСЕ –гетероструктурний сонячний елемент;

ГФЕ – газофазна епітаксія;

ГФП – гетерофото перетворювачі;

КСЕ – каскадний сонячний елемент;

ЛФД – лавинний фотодетектор;

РФЕ – рідиннофазна епітаксія;

СЕ – сонячний елемент.

ВСТУП

Приймачі інфрачервоного (ІЧ) випромінювання використовувались переважно лише в областях спеціального призначення.

За принципом дії фото приймальні пристрої ІЧ-діапазону розділяють на дві групи – фотонні і теплові. Ціни фотонних детекторів, як правило, прив'язані до систем охолодження та термостатування. Теплові приймачі ІЧ випромінювання менш чутливі, більш інерційні порівняно з фотонними приймачами, але працюють при кімнатній або близькій до неї температурі й відносно дешеві, що визначає їх конкурентну спроможність й масштабність використання в різних областях. В цілому можна виділити декілька головних завдань, що на сьогоднішній момент є назрілими для розробників загальнодоступних фотоприймачів ІЧ діапазону:

- оптимізація фотонних приймачів для роботи при кімнатних температурах;
- створення матриць теплових ІЧ приймачів і досягнення граничних характеристик;
- використання для вимірювань в декількох спектральних діапазонах.

Тому метою даної роботи було створення багатосекційного фотодетектору інфрачервоного випромінювання на основі короткохвильової та довгохвильової секцій зAlGaAs.

1 ГЕТЕРОСТРУКТУРНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ З'ЄДНАНЬ АIIIBV

1.1 Переваги та недоліки гетероперехідних сонячних елементів

Гетеропереходи являють собою переходи, які утворюються при контакті двох напівпровідників з різною енергетичною шириною заборонених зон. Типова зонна енергетична діаграма *np*-гетеропереходу, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, показана на рисунку 1.1 [1 - 16].

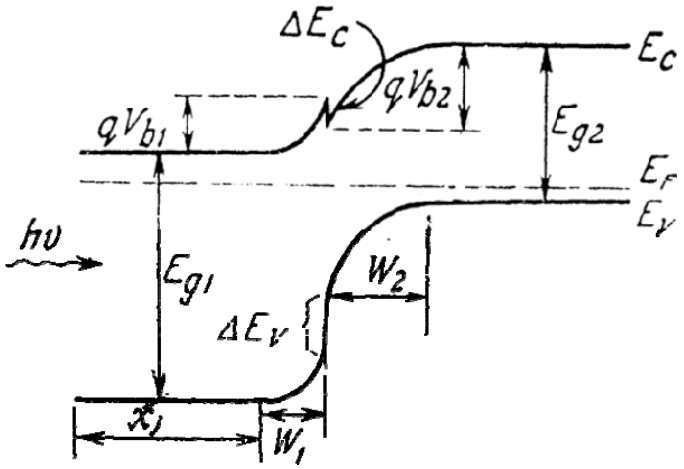


Рисунок 1.1 — Діаграма енергетичних зон np-гетеропереходів в стані термодинамічної рівноваги

Фотони з енергією, меншою *Eg*1, але більшою *Eg*2, будуть проходити через шар першого напівпровідника, який грає роль оптичного вікна, і поглинається в другому напівпровіднику. Далі носії будуть розділятися гетеропереходом. Якщо енергія фотонів більше *Eg*1, то вони будуть поглинатися в першому напівпровіднику. Перехід буде розділяти носії, які генеруються цим випромінюванням на відстані від переходу, що не перевищує дифузійну довжину, або безпосередньо в області просторового заряду переходу. В разі *p*-*n*-гетеропереходу густина фотоструму збіднених шарів дорівнює:

$$J_{dt} = q \cdot F \cdot (1-R) \cdot \left[\exp\left(-\alpha_1 \cdot x_j\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\alpha 1 W 1\right)\right) + \right.$$

$$\left. + \exp\left(-\alpha_1 \cdot \left(W_1 + x_j\right)\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\alpha_2 \cdot W_2\right)\right) \right], \quad (1.1)$$

де $W1$ і $W2$ - товщини збідненого шару в напівпровідниках;

α1 і α2 - коефіцієнти поглинання в першому і другому напівпровідниках відповідно.

Основні переваги СЕ з гетеропереходами перед звичайними сонячними елементами з pn-переходами [16]:

— збільшення спектрального відгуку в короткохвильовому діапазоні за умови, що енергія Eg1 досить велика і фотони з високою енергією поглинаються в збідненим шарі другого напівпровідника;

— зниження послідовного опору за умови, що перший напівпровідник можна сильно легувати, не погіршуючи при цьому умови проходження світла через нього;

— висока радіаційна стійкість, якщо перший шар напівпровідника досить товстий і напівпровідник має широку заборонену зону.

— здатність ефективно перетворювати сильно концентроване сонячне випромінювання, що відкриває перспективи істотного (пропорційного ступеня концентрування) зниження площі і вартості СЕ і внаслідок цього зниження вартості «сонячної» електроенергії.

До основних критеріїв вибору матеріалів для СЕ на основі гетеропереходних структур [10] відносяться:

— відсутність піків на краях зони провідності (або валентної зони), що погіршують проходження фотогенерованих носіїв;

— близькість до нуля величин ΔEc (або ΔEv в разі поглинає шару n-типу) для максимального збільшення контактної різниці потенціалів Ud і напруги холостого ходу Uxx;

— ширина забороненої зони Eg яка поглинає шару, яка повинна

знаходитися в інтервалі від 1,4 до 1,6 еВ для підвищення ефективності перетворення;

— велика ширина забороненої зони Eg2 поверхневого шару і для розширення спектрального діапазону пропускання сонячного випромінювання;

— близькі значення коефіцієнтів теплового розширення матеріалів;

— мале невідповідність параметрів кристалічних граток напівпровідникових матеріалів. В результаті можна істотно знизити втрати, пов'язані з поверхневою рекомбінацією носіїв заряду в прямозонних матеріалах.

У багатьох випадках при великих невідповідності параметрів кристалічних граток квантова ефективність знижується лише незначно, проте з'являються струмові витоку, що знижують напругу Uxx і коефіцієнт заповнення ВАХ.

Найбільш широко для створення СЕ застосовуються монокристалічні гетеропереходи між напівпровідниковими матеріалами на основі арсеніду, фосфідів і антимонідів Ga і Al.

Перші фотоелементи на основі арсеніду галію були створені на початку 1960-х років. Вони відразу ж знайшли застосування в космічних дослідженнях завдяки стійкості до космічного випромінювання і високої ефективності фотоперетворення. З усіх з'єднань груп III-V найбільш широко застосовуються InP і GaAs, оскільки вони мають майже ідеальну ширину забороненої зони в 1,4 еВ. Найбільша ефективність на структурах з одним переходом була досягнута на тонкоплівкових пристроях, сформованих методом газофазної епітаксії: 25,8% для GaAs і 21,9% для InP [13].

Недоліком пристроїв на плівках сполук III-V груп є висока вартість підкладок, які забезпечують епітаксіальне зростання цих матеріалів. Крім цього, ефективність фотоперетворення плівок дуже чутлива до домішок і структурним дефектів, що не дозволяє спростити технологію їх осадження і знизити вартість виробництва осередків. Надалі для вирішення даного завдання стали використовувати осередки з декількома переходами, що забезпечують

більш повне поглинання сонячного спектра, концентрувати сонячну енергію з великої площі на невеликій фотоелемент. У другому випадку замість дорогого фотоелемента використовується істотно більш дешеве концентрує пристрій, наприклад лінза Френеля. В результаті вартість фотоелемента знижується пропорційно ступеню ко нцентрування сонячного випромінювання. Сучасний рекорд ефективності фотоперетворення, досягнутий на структурі з трьома переходами при концентруванні в 364 рази, становить 41,6% [4].

Збільшення кількості гетеропереходов більше трьох призводить до значного подорожчання фотоелемента, тому основний ринок для високоефективних пристроїв з трьома і більше гетеро переходами - аерокосмічна промисловість.

При виготовленні гетеропереходних СЕ можуть виникати такі проблеми [10,16]: взаємна дифузія компонентів активного шару СЕ, вплив поверхневих станів, освіту з'єднань на міжфазній межі розділу, вплив оксидних шарів, що утворюються до і в процесі вирощування структур. При температурах вирощування взаємна дифузія може проявлятися слабо або сильно. У першому випадку дифузний перенесення матеріалу викликає зміни лише ступеня легування.

У другому випадку взаємна дифузія може привести до формування на металургійної межі переходу проміжного (третього за рахунком) шару, який буде марно поглинати фотони з енергією, що перевищує ширину забороненої зони цього шару.

У широкозонних матеріалах спостерігається тенденція до само компенсації, що ускладнює отримання низькоомного матеріалу. В основному це стосується тонких полікристалічних плівок, де даний ефект найсильніше проявляється в областях роз упорядкування (наприклад, на кордонах зерен).

Важливо також враховувати вплив поверхневих станів. Поверхні більшості напівпровідників мають потенціал, що відрізняється від потенціалу в обсязі. У ряді матеріалів сильний вплив поверхневих станів призводить навіть до зміни типу провідності поверхні. Наприклад, атомарному чиста поверхня p-

InP після впливу кисню навіть при невисоких температурах або після очищення за допомогою іонів аргону (Ar) набуває n-тип провідності. В результаті зіткнення чистої поверхні напівпровідника (утворилася після відколу) з повітрям дуже швидко утворюється тонка плівка оксиду, що також впливає на властивості переходу. Наприклад, в разі GaAs або InP при кімнатній температурі оксидна плівка товщиною близько 15 нм формується протягом декількох секунд. Таким чином, виготовлення гетеропереходних СЕ є складним багатофакторним технологічним процесом. При розробці технологічного процесу необхідно враховувати всі вище перераховані проблеми.

1.2 Гетероструктурні сонячні елементи на основі сполук AIIIBV

Напівпровідникові сполуки AIIIBV і тверді розчини на їх основі володіють хорошими характеристиками для фотовольтаїчного перетворення сонячного світла. Для оптимізації параметрів сонячних елементів використовується широкий спектр AIIIBV напівпровідникових з'єднань в різних комбінаціях, але найбільш часто використовуються GaAs і InP [3]. Арсенід галію є прямозонним напівпровідником, сильно поглинає у видимій області спектра. При спектральному складі падаючого сонячного випромінювання, що відповідає умовам AM1 на глибині близько 2 мкм поглинається 97% всіх фотонів. Напівпровідник відноситься до кубічної сингонії зі структурним типом цинкової обманки.

Ширина забороненої зони GaAs (1,43 еВ) близька до значення, оптимального для цілей фотоелектричного перетворення сонячної енергії. В умовах сонячного освітлення AM1 теоретичну межу ККД становить 26-29%. Ширина забороненої зони і простота виготовлення потрійних сполук з малим невідповідністю параметрів решіток висувають GaAs на роль основного конкурента Si серед найбільш вивчених напівпровідникових матеріалів.

Внаслідок більш високого рівня поглинання сонячного випромінювання, що визначається прямими оптичними переходами в GaAs, високі ККД СЕ на їх

основі можуть бути отримані при значно меншій порівняно з кремнієм товщині СЕ.

Принципово досить мати товщину фотоперетворювача з гетеропереходів (ГФП) 5-6 мкм для отримання ККД порядку не менше 20%, тоді як товщина кремнієвих елементів не може бути менше 50-100 мкм без помітного зниження їх ККД.

СЕ на основі гетероструктур з'єднань AIIIBV мають також більш сприятливими з точки зору вимог до перетворювачів експлуатаційними характеристиками в порівнянні з кремнієвими СЕ. Завдяки великій ширині забороненої зони існує можливість досягнення малих початкових значень зворотних струмів насичення в pn-переходах. Це, в свою чергу, значно розширює сферу лінійної залежності потужності СЕ від щільності світлового потоку.

Розглянуті СЕ більш стійкі до коливань температури. Підвищення рівноважної температури до 150-180 °С не призводить до істотного зниження їх ККД і оптимальної питомої потужності. У той же час для кремнієвих СЕ підвищення температури вище 60-70 °С знижує їх ККД в два рази. Завдяки стійкості до високих температур арсенід-галієві СЕ дозволяють застосовувати до них концентратори сонячного випромінювання.

Як уже зазначалося, гетерофотоперетворювачі(ГФП) на основі GaAs в значно меншій мірі, ніж кремнієві СЕ, схильні до руйнування потоками протонів і електронів високих енергій.

Таким чином, енергетичні, масові та експлуатаційні характеристики СЕ на основі GaAs більшою мірою відповідають вимогам СЕС та космічних СЕС, ніж характеристики кремнієвих СЕ. Однак кремній є значно більш доступним і освоєним у виробництві матеріалом, ніж арсенід галію. Кремній широко поширений в природі, і запаси вихідної сировини для створення СЕ на його основі практично необмежені. Технологія виготовлення кремнієвих СЕ добре відпрацьована і безперервно удосконалюється. Існує реальна перспектива зниження вартості кремнієвих СЕ на один-два порядки при впровадженні нових

автоматизованих методів виробництва. Вирощування кристалів GaAs зазвичай здійснюють методами Бріджмена і Чохральського. Далі із злитків шляхом різання, шліфування й полірування виготовляють підкладки, на яких методами газофазної або рідиннофазної епітаксії вирощують епітаксіальні шари.

Майже повний збіг параметрів кристалічних решіток і відсутність рекомбінаційних центрів на міжфазній межі в ізотипних переході AlGaAs-GaAs успішно використовується для усунення втрат, пов'язаних з рекомбінацією носіїв на лицьовій поверхні в СЕ з гетерофазним кордоном розділу. У даній структурі шар AlGaAs грає роль широкозонного вікна, призначеного для захисту фотоактивного області СЕ від дії поверхневих станів. Як фотоактивного області виступають p-n-шари GaAs.

Вже згадана структура була запропонована в 1960-х роках в ФТІ ім. А.Ф. Іоффе. У гетероструктурі вдалося сформувати бездефектну гетерограніцями і забезпечити ідеальні умови для фотогенерації електронно-доручених пар і їх збирання p-n-переходом. Оскільки ГФЕ з арсенід-галієвої фотоактивного областю виявилися ще й більш радіаційно стійкими, вони швидко знайшли застосування в космічній техніці, незважаючи на значно вищу вартість в порівнянні з кремнієвими СЕ [2, 5].

На рисунку 1.2, а показана зонна діаграма СЕ на основі гетероструктури p-Ga1-xAlxAs/p-GaAs/n-GaAs. Ширококутного напівпровідник тут використовується в якості оптичного вікна, що пропускає фотони з енергією, меншою Eg1. Фотони з енергіями в діапазоні Eg2-Eg1 створюють носії в pn-гомопереході на основі GaAs.

Оскільки коефіцієнт поглинання світла в вузькозонних напівпровідниках великий, генерація носіїв буде відбуватися в збідненим шарі або в прилеглій області та ефективність збирання носіїв виявиться високою.

Слід зазначити, що структура p-Ga1-xAlxAs/p-GaAs/n-GaAs найбільш широко застосовується на практиці.

Структура p-Al0,7Ga0,3As/p-GaAs/n-GaAs була виготовлена в 1972 р Вудалом і Ховел [Woodall, Hovel] методом рідиннофазної епітаксії і мала η =

15,3 і 19,1% при AM1 і AM2 відповідно. Проміжний шар GaAs p-типу провідності формувався в результаті дифузії цинку Zn при осадженні шару AlGaAs в пластині n-GaAs.

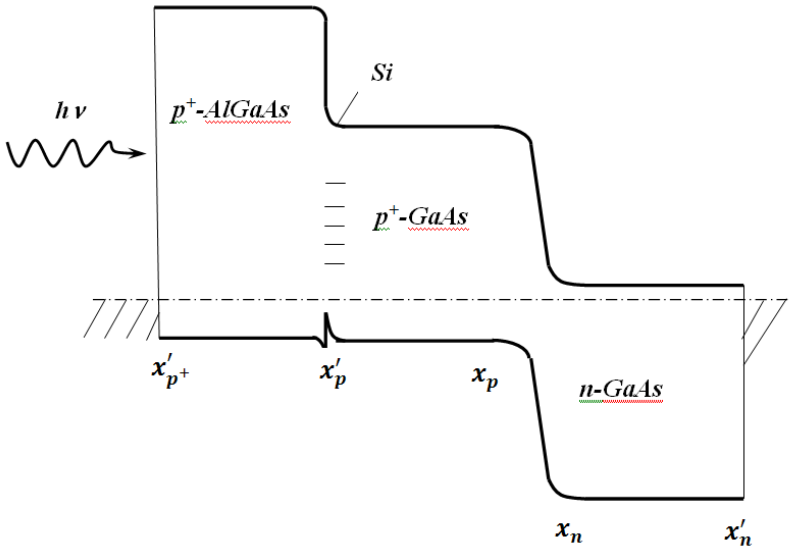


Рисунок 1.2 — Енергетична зонна діаграма СЕ на основі гетероструктуриAlGaAs/GaAs [3]

В даний час розглядається структурі в якості базового матеріалу використовується n-GaAs з концентрацією основних носіїв (1-5) · 1017 см-3. Даний матеріал виходить методом епітаксійного вирощування з газової або рідкої фаз на підкладку GaAs.

Шар p-GaAs (10^{18}-10^{19} $см^{-3}$) товщиною 0,5-3,0 мкм виходить або епітаксіальним вирощуванням, або за рахунок дифузії цинку або берилію при вирощуванні шару твердого розчину AlxGa1-xAs, легованого однієї з цих домішок. Товщина широкозонного шару AlxGa1-xAs (x = 0,8-0,85) шару складає 0,1-1,0 мкм [16]. Використання широкозонного «вікна», виконаного з тонкого шару твердого розчину AlGaAs, практично повністю прозорого для сонячного випромінювання, забезпечує пасивацію поверхні фотоактивного області і досягнення величин ККД, близьких до граничних теоретичним значенням.

Важливим етапом при виготовленні СЕ є формування контактів до тонким фронтальним верствам. Контактна сітка гетеропереходних СЕ, призначених для перетворення концентрованого сонячного випромінювання, так само як і в кремнієвих потужних СЕ, являє собою систему радіальних смуг і концентричних кілець. Оптимальна ширина контактних смуг близько 10-20 мкм, відстань між смугами 150-250 мкм при ступеня затінення активної поверхні контактами 5-10%. Для забезпечення адгезії і низького контактного опору наносяться багатошарові або багатокомпозиційні покриття, наприклад: Au / Zn, Ag / Mn, Ag / Zn, Cr + Ni, Pd + Ni, Pd + Zn + Au. В якості контактних матеріалів до тильної поверхні підкладки n-GaAs зазвичай використовується Ni або евтектичних сплав Au / Ge.

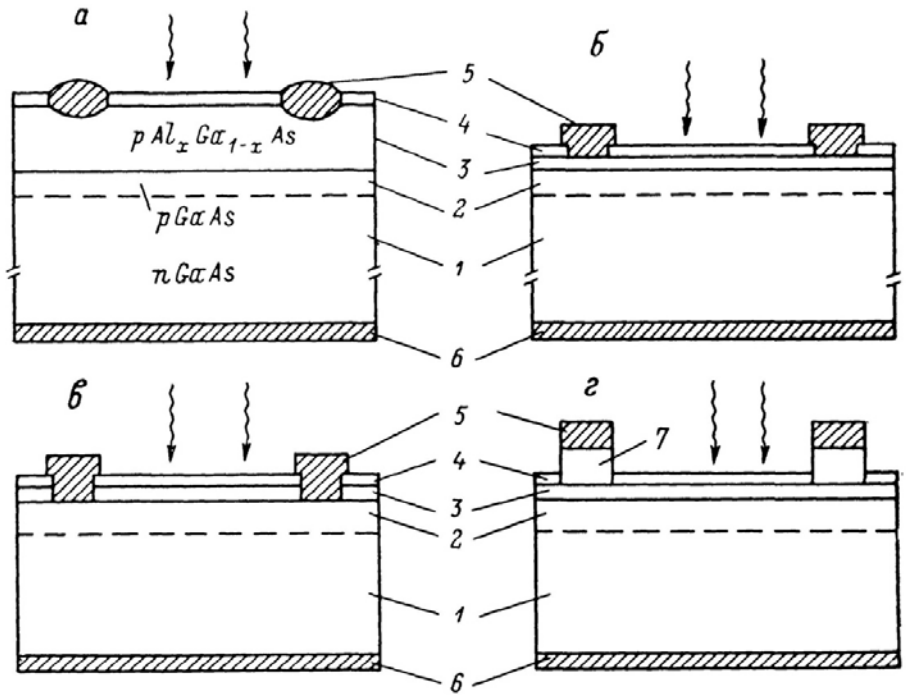
Полоскові контакти в структурах з товстим шаром AlxGa1-xAs наносяться безпосередньо на шар твердого розчину, в при поверхневих область якого попередньо проводиться дифузія цинку з газової фази, що збільшує поверхневу концентрацію акцепторів, а для поліпшення адгезії перед дифузією і нанесенням контакту витравлюють полоскові поглиблення.

У структурах з тонким широкозонним шаром контакти виготовляють одним із способів, показаних на рисунку 1.3, б-р: безпосередньо до шару твердого розчину (б), до шару p-GaAs в полоскових «вікнах», витравлених в шарі p-AlxGa1-xAs (в), до шару p + -GaAs, додатково вирощеному на твердому розчині і селективно стравлювати в місцях, вільних від контактів (г). Покриття, що просвітлюють в СЕ на основі AlGaAs-структур виконуються або анодним окисленням поверхні шару AlxGa1-xAs, або напиленням тонких плівок Si3N4, ZnS, Ta2O5 і ін.

При використанні просвітлюючого покриття з Si3N4 втрати на відбиття складають приблизно 12%. Двошарове покриття, що просвітлює, що складається, наприклад, з Ta2O5 і SiO2, дозволяє знизити втрати на відбиття до приблизно 4%.

Розглянута на рисунку 1.3 структура СЕ в багатьох сучасних конструкціях елементів зберіглась. Також розроблені конструкції з двома і

більше переходами, із збільшеною кількістю виводів.



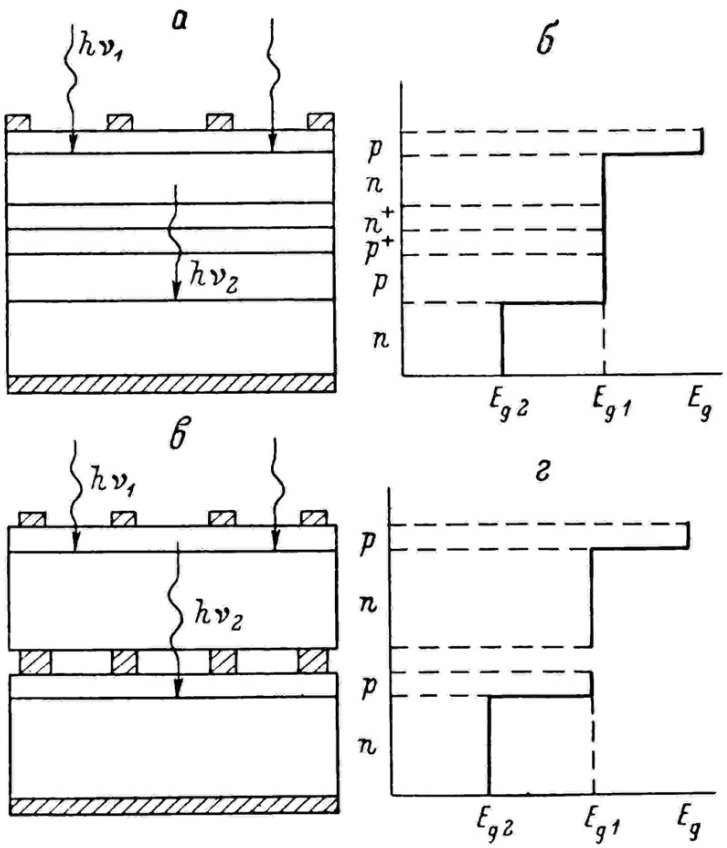
1 - n-GaAs; 2 - p-GaAs; 3 - p-AlGaAs; 4 - покриття, що просвітлює;

5 - полоскові контакти; 6 - суцільний тильний контакт;

7 - додатковий шар p + -GaAs

Рисунок 1.3 — Схеми різних способів формування полоскових контактів до гетероструктур n-GaAs/p-GaAs/p-AlGaAs

Подальше збільшення ККД забезпечують каскадні сонячні елементи (КСЕ), виготовлені на основі багатошарових гетероструктур з двома і більше pn-переходами в матеріалах з різними ширинами забороненої зони (Рисунок 1.4).



а, б - монолітна конструкція з тунельним p + -n + -переходить;

в, г - каскадні елементи з механічною стикового, з'єднані за допомогою контактної сітки [16]

Рисунок 1.4 – Схематичне зображення (з ліва) і розподіл ширини забороненої зони Eg (з права) для КСЕ двох типів

У таких елементах «верхній» pn-перехід, виконаний в більш широкозонному матеріалі, призначений для ефективного перетворення коротко хвильової частини сонячного випромінювання, а «нижній» pn-перехід, виконаний в вузько зонних матеріалі, оптимізується для перетворення довгохвильового випромінювання, що проходить через ширококутного елемент. Теоретичні оцінки показують, що в таких складних фотоперетворювачах можливе досягнення ККД більше 40%.

Верхній елемент в кожному КСЕ виконаний на основі гетероструктури, ширококутного шар якої має ширину забороненої зони Eg1. Вузькозонний шар

«нижнього» СЕ має Eg2.

На рисунку1.4 (а, б) представлена монолітна конструкція КСЕ в якому «верхній» і «нижній» елементи з'єднані тунельним p + -n + -переходить, що забезпечує низькі омічні втрати.

Істотне підвищення ККД КСЕ було досягнуто в конструкції з механічною стикуванням (Рисунок 1.4, в, г). В даному випадку два фотоелементи з'єднані через сітчастий омічний контакт. Як матеріал широко зонного елемента в цій конструкції використовується GaAs, а матеріалом вузько зонних елемента служить InGaAs або GaSb. При цьому GaAs-елемент виконується прозорим для інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі більше 0,9 мкм, а вузько зонних елемент забезпечує ефективне перетворення довгохвильової частини сонячного випромінювання в спектральному інтервалі 0,9 ÷ 1,8 мкм. Такі СЕ мають ККД 32-33% для (50 ÷ 100) - концентрованого сонячного випромінювання при наявності повітряних мас (АМ 1,5).

Основні перешкоди в реалізації розглянутих конструкцій СЕ полягають у труднощі здійснення послідовного з'єднання верхнього і нижнього елементів без внесення додаткових омічних і оптичних втрат. У разі «тунельного» варіанту з'єднання значно ускладняються технологія виготовлення таких структур, і виникають додаткові омічні втрати на проходження через тунельний p + -n +-перехід. У другому випадку (Рисунок 1.4, в, г) відбуваються додаткові оптичні втрати при проходженні світла з верхнього СЕ в нижній.

Зниження втрат в цьому випадку може бути досягнуто просвітленням тильній поверхні верхнього елемента і лицьової поверхні нижнього елемента, з'єднанням цих СЕ через оптичне середовище з великим показником заломлення, а також зменшенням площі сітчастого контакту, що з'єднує елементи каскаду [16].

ККД всього КСЕ визначається оптимальним поєднанням ширин заборонених зон першого і другого каскадів СЕ. Так, при концентрації сонячного випромінювання в 1000 разів максимальне значення ККД становить 43,5% при Eg1 = 1,6-1,7 еВ і Eg2 = 1,0 еВ. В цілому характеристики ГСЕ

поліпшуються декількома шляхами [10, 16]:

— оптимізується товщина активних верств ГСЕ і рівень їх легування;

— розвиваються технологічні методи, вдосконалюється технологічне обладнання для виготовлення ГСЕ, розробляються і застосовуються нові методи отримання складних багатокомпонентних твердих розчинів, на основі яких виготовляються ГСЕ.

Шляхом варіювання рівня легування n- і p-областей при збереженні високих значень дифузійної довжини Ln в p-шарі можна домогтися максимальних значень Uxx. У разі p-n-переходів, в яких перенесення носіїв здійснюється за рекомбінаційно-генераційного механізму, ця оптимізація включає підбір значення товщини збідненого шару в напівпровідниках. При цьому необхідно також враховувати вплив рівня легування в квазінейтральної області на час життя в збідненим шарі.

Розрахунки показали, що оптимальне значення концентрації домішок Nd лежить в інтервалі 10^{16}-10^{17} $см^3$, де відсутня сильна залежність η від Nd. На основі наявних матеріалів можна виготовити СЕ з η <22% в умовах освітлення AM0 без урахування затінення струмознімальною сіткою і втрат на оптичне відображення.

У СЕ, де домінують механізми інжекції і дифузії носіїв, можливості оптимізації ширше, причому можуть виявитися більш вигідними високі рівні легування.

Однією з головних проблем, що стоять на шляху наближення ККД тандемних фотоелектричних перетворювачів на основі GaAs-AlGaAs до теоретичної межі, є утворення стимульованих киснем дефектів в активних шарах гетероструктури, а також дефектів на границях розподілу pn-переходів [32]. Для мінімізації даного ефекту в 1990 р [33] було запропоновано використовувати для виготовлення верхнього pn-переходу шари InGaP, а для широко зонного вікна - AlInP. Особливістю InGaP є значно більша стійкість до утворення дефектів під впливом кисню [34]. Однак і для даних гетероструктур існує проблема, пов'язана, зокрема, з отриманням сильно легованих шарів p-

типу провідності.

З метою підвищення якості каскадних гетероструктур на основі GaAs-AlGaAs використовувалися легування ізовалентними елементами [35]. Зменшенню дефектності і поліпшенню відтворюваності електрофізичних параметрів активних верств AlGaAs і InGaAs, сприяло додаткове легування вісмутом (0,07-0,1 ат.%) Галієвих розчинів-розплавів, з яких вони нарощувалися.

Контакти до n + -підкладка формувалися на основі системи Au-Ni, а фронтальні до шару p-Al0,14Ga0,86As - на основі Au-Ge-Au. Гетероструктури виготовлялися методом низькотемпературної рідиннофазної епітаксії (РФЕ). На поверхню гетероструктури наносилось анти відбиваюче покриття з SiO2, в якому, як і в широко зонному шарі p-Al0,8Ga0,2As, з використанням фотолітографії створювалися наскрізні канавки до поверхні шару p-Al0,8Ga0,2As. Через канавки додаткової після ростової дифузії цинку з газової фази в при поверхневої області шару p-$Al_{0,14}Ga_{0,86}As$ формувався сильно легований шар з концентрацією дірок, що дорівнює 1 10^{19} $см^{-3}$, і товщиною 0,2-0,3 мкм. Ця операція дозволила знизити омічні втрати в СЕ. Затінення контактними смугами становило близько 12%. На кожному фотоелементі хімічним травленням формувалася мезоструктур для зменшення струмів витоку.

На рисунку 1.5 наведені ВАХ двох СЕ, виготовлених на основі розглянутих тандемних гетероструктур виміряні при спектральних умовах АМ 1,5. Крива 1 відповідає фотоелементу з найкращими, а крива 2 - з найгіршими параметрами з партії в 27 фотоелементів. Щільність струму, що генерується СЕ площею 0,93 см2, змінювалася від 14,2 до 15,1 мА / $см^2$, а напруга холостого ходу Uxx = 2,35-2,43 В. Коефіцієнт корисної дії найкращих зразках досягав 30,1% [32].

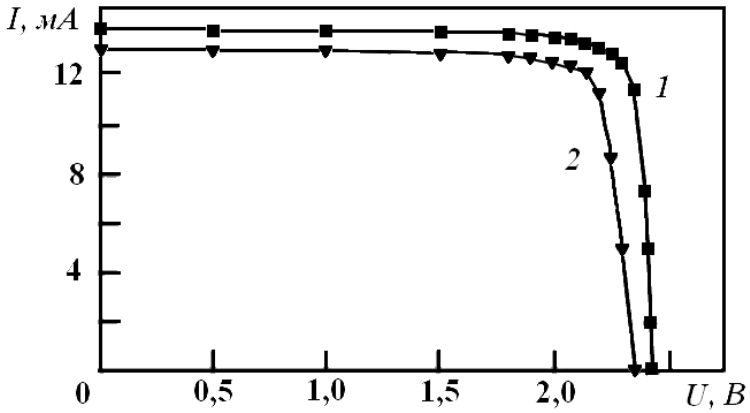


Рисунок 1.5 — ВАХ СЕ на основі гетероструктур InGaAs-Alx1Ga1-x1As - Alx2Ga1-x2As [32]: максимальні (1) і мінімальні (2) значення досягнутих параметрів

Відзначимо, що до середини 1980-х років вдосконалення СЕ як на основі кремнію, так і арсеніду галію здійснювалося на базі відносно простих структур і простих технологій. Для СЕ на основі арсеніду галію при вирощуванні широкозонного вікна AlGaAs необхідно було застосовувати рідиннофазну або газофазну методику. Як уже зазначалося, в разі РФЕ необхідно було вирощувати всього один шар p-AlGaAs, в той час як p-n-перехід виходив за рахунок дифузії домішки p-типу з розплаву в базовий матеріал n-типу.

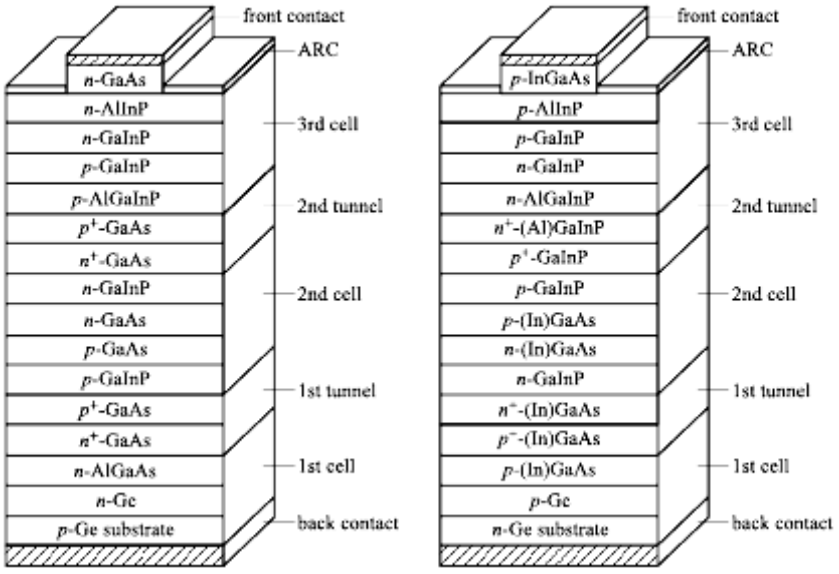
Розвиток технологічних методів, удосконалення технологічного обладнання, розробка нових методів отримання складних багатокомпонентних твердих розчинів привело до різкого стрибка ефективності перетворення як кремнієвих, так і арсенід галієвих СЕ.

В цілому прогрес в сфері СЕ на основі арсеніду галію був обумовлений застосуванням нових епітаксійних методів вирощування гетероструктур.

Реалізувати монолітний КСЕ вдалося після того, як для їх виготовлення застосували вирощування багатоперехідних гетероструктур методами молекулярно-пучкової епітаксії (МВЕ) або епітаксії з газової фази, що містить метало-органічні сполуки елементів III групи, і гідридів елементів V групи таблиці Менделєєва (MOCVD-технологія).

Послідовне з'єднання фотоелементів здійснюється за допомогою тунельного pn-переходу, спеціально формованого між каскадами. Надалі до процесу фотоелектричного перетворення був підключений і третій каскад з pn-переходом в германієвої підкладці (Рисунок 1.6). У гетероструктурі (Al) GaInP / GaAs / Ge (Рисунок 1.6, а) другий елемент, а також перший і другий тунельні переходи виконані з GaAs. У гетероструктурі (Al) GaInP / (In) GaAs / Ge (Рисунок 1.6, б), перший тунельний перехід виконаний з InGaAs, в той час як другий елемент і другий тунельний перехід виконані з (Al) GaInP [2].

На думку авторів [2], для багатоперехідних СЕ, що складаються з декількох десятків каскадів, граничний ККД дуже близький до циклу Карно і становить майже 87%. Таким чином, багатоперехідних СЕ, окрім демонстрації вже сьогодні найвищих значень ККД і перспективи їх підвищення в найближчому майбутньому, мають найкращі «фундаментальні» перспективи.



а *б*

а - гетероструктура (Al) GaInP / GaAs / Ge;

б - гетероструктура (Al) GaInP / (In) GaAs / Ge [2]

Рисунок 1.6 — Поперечні розрізи сонячних елементів з трьома pn-переходами

2 КАСКАДНІ ФОТОПРИЙМАЧІ З НАНОСТРУКТРАМИ

2.1 Формування енергетичної діаграми активної області фотоприймача

По обидва боки від вузькозонних напівпровідника в місцях металургійних контактів між шарами широкозонного і вузькозонних напівпровідника виникають гетеропереходи, які формують на енергетичній діаграмі багатошарової надгратки потенційні бар'єри для електронів в зоні провідності для важких і легких дірок у валентній зоні. Енергетичні висоти потенціальних бар'єрів в кожній зоні обумовлені розривами кордонів зон, за рахунок різниці енергії заборонених зон і енергій електронного спорідненості контактуючих матеріалів. При цьому, якщо хімічний склад бар'єрних (обмежених) шарів різний для обох бар'єрів по обидва боки вузькозонного матеріалу, то відповідно будуть відрізнятися і висоти бар'єрів для кожного сорту частинок (електронів і дірок) на металургійних межах шарів.

Правило Міллера для кожного потенційного бар'єру можна вважати справедливим і для умов даної багатошарової надгратки може бути записано так:

$$\Delta E_{C1} : \Delta E_{V1} = 0{,}65 : 0{,}35 \cdot \Delta Eg1, \tag{2.1}$$

$$\Delta E_{C3} : \Delta E_{V3} = 0{,}65 : 0{,}35 \cdot \Delta Eg3, \tag{2.2}$$

в свою чергу

$$\Delta Eg1 = Eg1\left(C^{III}_{X1} A^{III}_{1-X1} B^{V}\right) - Eg\left(A^{III} B^{V}\right), \tag{2.3}$$

$$\Delta Eg3 = Eg3\left(C^{III}_{X3} A^{III}_{1-X3} B^{V}\right) - Eg\left(A^{III} B^{V}\right). \tag{2.4}$$

Для даної структури:

$$\Delta Eg1 = Eg\left(Al_{X1}Ga_{1-X1}As\right) - Eg\left(GaAs\right), \tag{2.5}$$

$$\Delta Eg3 = Eg\left(Al_{X3}Ga_{1-X3}As\right) - Eg\left(GaAs\right). \tag{2.6}$$

Енергія електронів і енергія квазічастинок (важких і легких дірок) на енергетичній діаграмі багатошарової надгратки, обмеженою несиметричними потенційними бар'єрами різної енергетичної висоти, відраховується, як і на зонного діаграмі об'ємного напівпровідника. Енергія електронів відраховується від нижньої точки зони провідності «вгору» по осі енергій, а енергія важких і легких дірок відраховується від вищої точки валентної зони «вниз». Тому енергетична схема завдання по визначенню власних значень і власних функцій частинок не залежить від сорту частинок і енергетичної зони, змінюються тільки ефективні маси і висоти обмежують потенційних бар'єрів, згідно виразів (2.3) - (2.6).

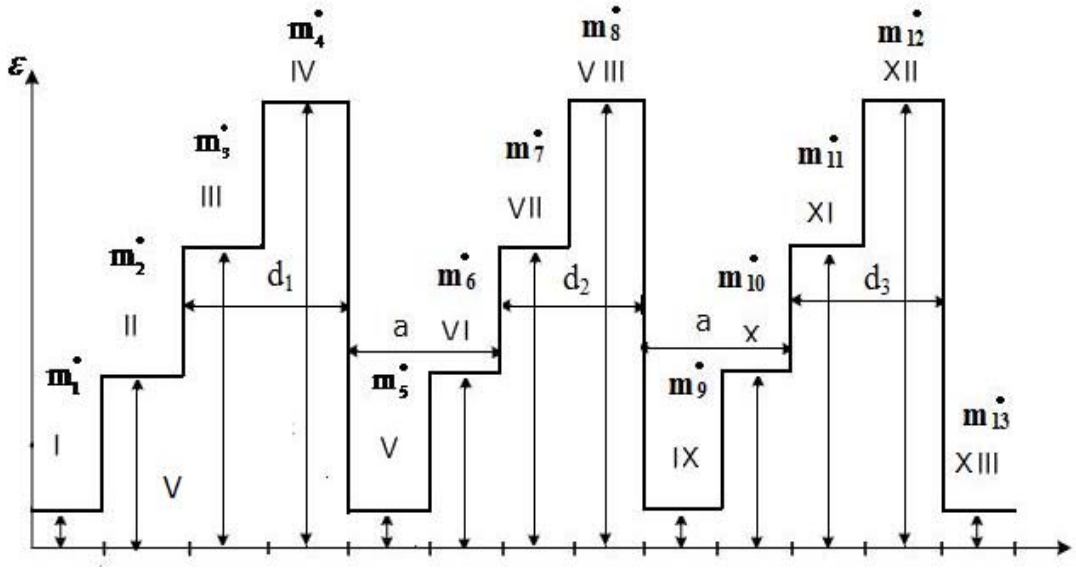


Рисунок 2.1 — Енергетична діаграма розглянутої структури багатошарової надгратки

Вихідна система рівнянь Шредінгера для багатошарової надгратки може бути записана так:

$$-\frac{h}{2m_1^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2}+V_1\varphi_1=E\varphi_1 \quad ; \qquad (2.7\ \text{а})$$

$$-\frac{h^2}{2m_2^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_2}{\partial z^2}+V_2\varphi_2=E\varphi_2 \quad ; \qquad (2.7\ \text{б})$$

$$-\frac{h^2}{2m_3^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_3}{\partial z^2}+V_3\varphi_3=E\varphi_3 \quad ; \qquad (2.7\ \text{в})$$

$$-\frac{h^2}{2m_4^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_4}{\partial z^2}+V_4\varphi_4=E\varphi_4 \quad ; \qquad (2.7\ \text{г})$$

$$-\frac{h^2}{2m_5^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_5}{\partial z^2}+V_5\varphi_5=E\varphi_5 \quad ; \qquad (2.7\ \text{д})$$

$$-\frac{h^2}{2m_6^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_6}{\partial z^2}+V_6\varphi_6=E\varphi_6 \quad ; \qquad (2.7\ \text{е})$$

$$-\frac{h^2}{2m_7^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_7}{\partial z^2}+V_7\varphi_7=E\varphi_7 \quad ; \qquad (2.7\ \text{ж})$$

$$-\frac{h^2}{2m_8^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_8}{\partial z^2}+V_8\varphi_8=E\varphi_8 \quad ; \qquad (2.7\ \text{з})$$

$$-\frac{h^2}{2m_9^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_9}{\partial z^2}+V_9\varphi_9=E\varphi_9 \quad ; \tag{2.7 і}$$

$$-\frac{h^2}{2m_{10}^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_{10}}{\partial z^2}+V_{10}\varphi_{10}=E\varphi_{10} \quad ; \tag{2.7 й}$$

$$-\frac{h^2}{2m_{11}^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_{11}}{\partial z^2}+V_{11}\varphi_{11}=E\varphi_{11} \quad ; \tag{2.7 к}$$

$$-\frac{h^2}{2m_{12}^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_{12}}{\partial z^2}+V_{12}\varphi_{12}=E\varphi_{12} \quad ; \tag{2.7 л}$$

$$-\frac{h^2}{2m_{13}^*}\cdot\frac{\partial^2\varphi_{13}}{\partial z^2}+V_{13}\varphi_{13}=E\varphi_{13} \quad . \tag{2.7 м}$$

де (2.7 а) - (2.7 м) m_1^* - m_{13}^* - ефективні маси частинок, кг;

V_1^* - V_{13}^* - висоти потенційних бар′єрів, еВ;

φ_1^* - φ_{13}^* - хвилеві функції у відповідних шарах «1» - «13», згідно рисунку 2.1; h – стала Планка.

Для подальшого вирішення систему (2.7 а) - (2.7 м) зручно привести до однорідного виду:

$$\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2}=-\frac{2m_1^*}{h^2}(E-V_1)\varphi_1 \quad ; \tag{2.8 а}$$

$$\frac{\partial^2\varphi_2}{\partial z^2}=-\frac{2m_2^*}{h^2}(E-V_2)\varphi_2 \quad ; \tag{2.8 б}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z^2} = -\frac{2m_3^*}{h^2}(E - V_3)\varphi_3 \quad ; \qquad (2.8\ \text{в})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial z^2} = -\frac{2m_4^*}{h^2}(E - V_4)\varphi_4 \quad ; \qquad (2.8\ \text{г})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_5}{\partial z^2} = -\frac{2m_5^*}{h^2}(E - V_5)\varphi_5 \quad ; \qquad (2.8\ \text{д})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_6}{\partial z^2} = -\frac{2m_6^*}{h^2}(E - V_6)\varphi_6 \quad ; \qquad (2.8\ \text{е})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_7}{\partial z^2} = -\frac{2m_7^*}{h^2}(E - V_7)\varphi_7 \quad ; \qquad (2.8\ \text{ж})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_8}{\partial z^2} = -\frac{2m_8^*}{h^2}(E - V_8)\varphi_8 \quad ; \qquad (2.8\ \text{з})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_9}{\partial z^2} = -\frac{2m_9^*}{h^2}(E - V_9)\varphi_9 \quad ; \qquad (2.8\ \text{і})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial z^2} = -\frac{2m_{10}^*}{h^2}(E - V_{10})\varphi_{10} \quad ; \qquad (2.8\ \text{й})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial z^2} = -\frac{2m_{11}^*}{h^2}(E - V_{11})\varphi_{11} \quad ; \qquad (2.8\ \text{к})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{12}}{\partial z^2} = -\frac{2m_{12}^*}{h^2}(E - V_{12})\varphi_{12} \quad (2.8\ \text{л})$$

;

$$\frac{\partial^2 \varphi_{13}}{\partial z^2} = -\frac{2m_{13}^*}{h^2}(E - V_{13})\varphi_{13} \quad (2.8\ \text{м})$$

.

Константи (ефективні маси частинок, постійна Дірака і висоти бар'єрів), а також задається величину енергії поглинається кванта світла можна для зручності подальших викладок звести в єдині коефіцієнти:

$$k_1^2 = \frac{2m_1^*}{h^2}(E - V_1) \quad (2.9\ \text{а})$$

;

$$k_2^2 = \frac{2m_2^*}{h^2}(E - V_2) \quad (2.9\ \text{б})$$

;

$$k_3^2 = \frac{2m_3^*}{h^2}(E - V_3) \quad (2.9\ \text{в})$$

;

$$k_4^2 = \frac{2m_4^*}{h^2}(E - V_4) \quad (2.9\ \text{г})$$

;

$$k_5^2 = \frac{2m_5^*}{h^2}(E - V_5) \quad (2.9\ \text{д})$$

;

$$k_6^2 = \frac{2m_6^*}{h^2}(E - V_6) \quad (2.9\ \text{е})$$

;

$$k_7^2 = \frac{2m_7^*}{h^2}(E - V_7) \quad ; \qquad (2.9\ \text{ж})$$

$$k_8^2 = \frac{2m_8^*}{h^2}(E - V_8) \quad ; \qquad (2.9\ \text{з})$$

$$k_9^2 = \frac{2m_9^*}{h^2}(E - V_9) \quad ; \qquad (2.9\ \text{і})$$

$$k_{10}^2 = \frac{2m_{10}^*}{h^2}(E - V_{10}) \quad ; \qquad (2.9\ \text{й})$$

$$k_{11}^2 = \frac{2m_{11}^*}{h^2}(E - V_{11}) \quad ; \qquad (2.9\ \text{к})$$

$$k_{12}^2 = \frac{2m_{12}^*}{h^2}(E - V_{12}) \quad ; \qquad (2.9\ \text{л})$$

$$k_{13}^2 = \frac{2m_{13}^*}{h^2}(E - V_{13}) \quad . \qquad (2.9\ \text{м})$$

З урахуванням перетворень (2.29 а) - (2.29 м) і пере позначень (2.30 а) - (2.30 м), система (2.28 а) - (2.28 м) остаточно перетвориться до виду:

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} + k_1^2 \varphi_1 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ \text{а})$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} + k_2^2 \varphi_2 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ б)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z^2} + k_3^2 \varphi_3 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ в)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial z^2} + k_4^2 \varphi_4 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ г)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_5}{\partial z^2} + k_5^2 \varphi_5 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ д)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_6}{\partial z^2} + k_6^2 \varphi_6 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ е)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_7}{\partial z^2} + k_7^2 \varphi_7 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ ж)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_8}{\partial z^2} + k_8^2 \varphi_8 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ з)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_9}{\partial z^2} + k_9^2 \varphi_9 = 0 \quad ; \qquad (2.10\ і)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial z^2} + k_{10}^2 \varphi_{10} = 0 \quad ; \qquad (2.10\ й)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial z^2} + k_{11}^2 \varphi_{11} = 0 \quad ; \qquad (2.10\ к)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{12}}{\partial z^2} + k_{12}^2 \varphi_{12} = 0 \quad ; \qquad (2.10\ л)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{13}}{\partial z^2} + k_{13}^2 \varphi_{13} = 0 \quad . \qquad (2.10\ м)$$

Рішення системи (2.10 а) - (2.10 м) відшукується у вигляді падаючої і відбитої хвиль в кожній області рішення:

$$\varphi_1 = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_2 z} \quad ; \qquad (2.11\ а)$$

$$\varphi_2 = A_2 e^{ik_2 (z-d_1)} + B_2 e^{-ik_2 z} \quad ; \qquad (2.11\ б)$$

$$\varphi_3 = A_3 e^{ik_3 (z-d_1)} + B_3 e^{-ik_3 (z-d_1)} \quad ; \qquad (2.11\ в)$$

$$\varphi_4 = A_4 e^{ik_4 (z-d_1-a)} + B_4 e^{-ik_4 (z-d_1-a)} \quad ; \qquad (2.11\ г)$$

$$\varphi_5 = A_5 e^{ik_5 (z-d_1-a-d_2)} + B_5 e^{-ik_5 (z-d_1-a-d_2)} \quad ; \qquad (2.11\ д)$$

$$\varphi_6 = A_6 e^{ik_6 (z-d_1-a-d_2-a_1)} + B_6 e^{-ik_6 (z-d_1-a-d_2-a_1)} \quad ; \qquad (2.11\ е)$$

$$\varphi_7 = A_7 e^{ik_7(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3)} + B_7 e^{-ik_7(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3)} \quad (2.11\ \text{ж})$$

;

$$\varphi_8 = A_8 e^{ik_8(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2)} + B_8 e^{-ik_8(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2)} \quad (2.11\ \text{з})$$

;

$$\varphi_9 = A_9 e^{ik_9(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4)} + B_9 e^{-ik_9(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4)} \quad (2.11\ \text{і})$$

;

$$\varphi_{10} = A_{10} e^{ik_{10}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3)} + B_{10} e^{-ik_{10}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3)} \quad (2.11\ \text{й})$$

;

$$\varphi_{11} = A_{11} e^{ik_{11}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3-d_5)} + B_{11} e^{-ik_{11}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3-d_5)} \quad (2.11\ \text{к})$$

;

$$\varphi_{12} = A_{12} e^{ik_{12}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3-d_5-a_4)} + B_{12} e^{-ik_{12}(z-d_1-a-d_2-a_1-d_3-a_2-d_4-a_3-d_5-a_4)} \quad (2.11\ \text{л})$$

;

$$\varphi_{13} = A_{13} e^{ik_{13}z} . \quad (2.11\ \text{м})$$

Амплітуда падаючої хвилі дорівнює: A1 = 1. Амплітуда відбитої хвилі дорівнює: B13 = 0.

Граничні умови

$$\varphi_n = \varphi_{n+1}\Big|_{z=b} \quad (2.12)$$

;

$$\frac{1}{m_n^*}\frac{\partial \varphi_n}{\partial z} = \frac{1}{m_{n+1}}\frac{\partial \varphi_{n+1}}{\partial z}\Bigg|_{z=b} . \quad (2.13)$$

Похідні від хвильових функцій в кожній області

$$\varphi_1^{'} = \frac{ik_1}{m_1^*} e^{ik_1 z} - \frac{ik_1}{m_1^*} B_1 e^{-ik_1 z} \quad ; \tag{2.14}$$

$$\varphi_2^{'} = \frac{ik_2}{m_2^*} A_2 e^{ik_2 z} - \frac{ik_2}{m_2^*} B_2 e^{-ik_2 z} \quad ; \tag{2.15}$$

$$\varphi_3^{'} = \frac{ik_3}{m_3^*} A_3 e^{ik_3(z-d_1)} - \frac{ik_3}{m_3^*} B_3 e^{-ik_3(z-d_1)} \quad ; \tag{2.16}$$

$$\varphi_4^{'} = \frac{ik_4}{m_4^*} A_4 e^{ik_4(z-d_1-a)} - \frac{ik_4}{m_4^*} B_4 e^{-ik_4(z-d_1-a)} \quad ; \tag{2.17}$$

$$\varphi_5^{'} = \frac{ik_5}{m_5^*} A_5 e^{ik_5(z-d_1-a-d_2)} \quad ; \tag{2.18}$$

Формування розрахункової матриці

$$z = d_1 \quad ; \tag{2.19}$$

$$A_2 e^{ik_2 d_1} + B_2 e^{-ik_2 d_1} - A_3 - B_3 = 0 \quad ; \tag{2.20}$$

$$A_2 e^{ik_2 d_1} + B_2 e^{-ik_2 d_1} - A_3 \frac{k_3 m_2}{k_2 m_3} - B_3 \frac{k_3 m_2}{k_2 m_3} = 0 \quad ; \tag{2.21}$$

$$z = d_1 + a \quad ; \tag{2.22}$$

$$A_3 e^{ik_3 a} + B_3 e^{-ik_3 a} - A_4 - B_4 = 0 \quad (2.23)$$
;

$$A_3 e^{ik_3 a} + B_3 e^{-ik_3 a} - A_4 \frac{k_4 m_3}{k_3 m_4} - B_4 \frac{k_4 m_3}{k_3 m_4} = 0 \quad (2.24)$$
;

$$z = d_1 + a + d_2 \quad (2.25)$$
;

$$A_4 e^{ik_4 d_2} + B_4 e^{-ik_4 d_2} - A_5 = 0 \quad (2.26)$$
;

$$A_4 e^{ik_4 d_2} + B_4 e^{-ik_4 d_2} - A_5 \frac{k_5 m_4}{k_4 m_5} = 0 \quad (2.27)$$
;

Визначник системи рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів розкладений B1-A13, і її правих частин.

$$\begin{Bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2} & \frac{k_2 m_1}{k_1 m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{ik_2 d_1} & e^{-ik_2 d_1} & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{ik_2 d_1} & -e^{-ik_2 d_1} & -\frac{k_3 m_2}{k_2 m_3} & \frac{k_3 m_2}{k_2 m_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{ik_3 a} & e^{-ik_3 a} & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{ik_3 a} & -e^{-ik_3 a} & -\frac{k_4 m_3}{k_3 m_4} & \frac{k_4 m_3}{k_3 m_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{ik_4 d_2} & e^{-ik_4 d_2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{ik_4 d_2} & -e^{-ik_4 d_2} & -\frac{k_5 m_4}{k_4 m_5} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

$$i = \frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot e \cdot \Delta V}{h^3} \cdot \int_0^{E_F} d(e) \cdot f_F(e) \cdot de \quad . \tag{2.29}$$

Рішення системи (2.28) відносно коефіцієнтів розкладу хвильових функцій дозволяє знайти коефіцієнти відображення і прозорості для всієї структури в цілому, за умови що середня енергія падаючих на структуру частинок, відома або задана. Потім, використовуючи вираз (2.29) і знаючи коефіцієнт прозорості структури можна обчислити середній тунельний струм.

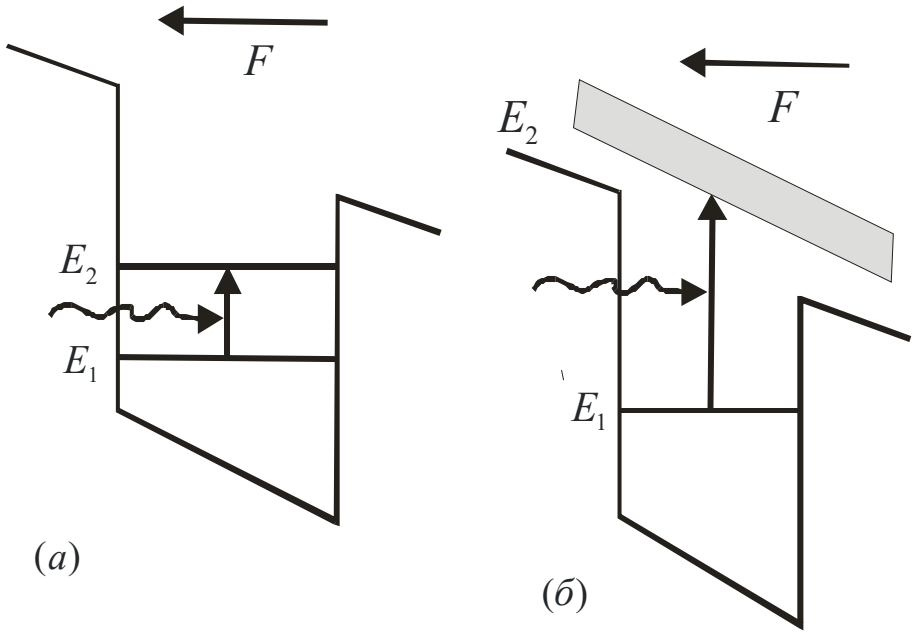
2.2 Прозорість надгратки в стаціонарному стані і під дією поля об′ємного заряду

В принципі квантові ями можуть застосовуватися для реєстрації світла в будь-якій області частот, що пов'язано з їх оптичними характеристиками, однак саме в інфрачервоній області (від 2 до 20 мкм) фотодетектори на квантових ямах представляють особливий інтерес, оскільки на них можуть бути організовані системи нічного і теплового бачення [22].

Основна проблема використання фотодіодів, заснованих на міжзонних переходах через заборонену зону E_g в напівпровідниках з $p-n-$переходами, пов'язана з тим, що малі значення E_g диктують необхідність роботи при дуже низьких температурах. Наприклад, для напівпровідників класу $A_{III}B_V$ ми обмежені сполуками $InAs_{1-x}Sb_x$ з $x \approx 0{,}5$. Для детекторів інфрачервоного випромінювання можна використовувати і напівпровідники $A_{II}B_{VI}$ (Наприклад, $HgCdTe$), Проте ці речовини є дуже м'якими, погано подаються обробці і мають високі значення темнова струмів. Крім цього, квантові ями видаються вельми зручними об'єктами для реєстрації інфрачервоного випромінювання, оскільки для них дипольні матричні елементи, відповідні межпідзонним оптичним переходом, дуже великі. Крім цього, дуже важливо, що довжина хвилі випромінювання може бути легко перебудована за рахунок змін параметрів ями

в процесі виготовлення (наприклад, ширини). Особливу цінність для практичних застосувань може мати створення ІЧ-детекторів в області 8-12 мкм, оскільки саме в цьому діапазоні лежить так зване атмосферний вікно, тобто область пропускання хвиль, що дозволяє здійснювати оптичну зв'язок, зв'язок із супутниками, використовувати лазери на CO_2 (10,6 мкм) і т. П.

На рисунку 2.2 показані дозволені переходи з поглинанням, зручні для детектування інфрачервоного випромінювання ізольованими квантовими ямами при впливі зовнішнього електричного поля (природно, що в практичних пристроях використовуються не окремі, а множинні квантові ями).



а - межпідзонні переходи;

б - перехід між зв'язаним станом і станом всередині вузької безперервної зони станів поза потенційною ямою;

F - прикладене електричне поле.

Рисунок 2.2 — Оптичні переходи у квантових ямах з поглинанням при реєстрації ІЧ-випромінювання

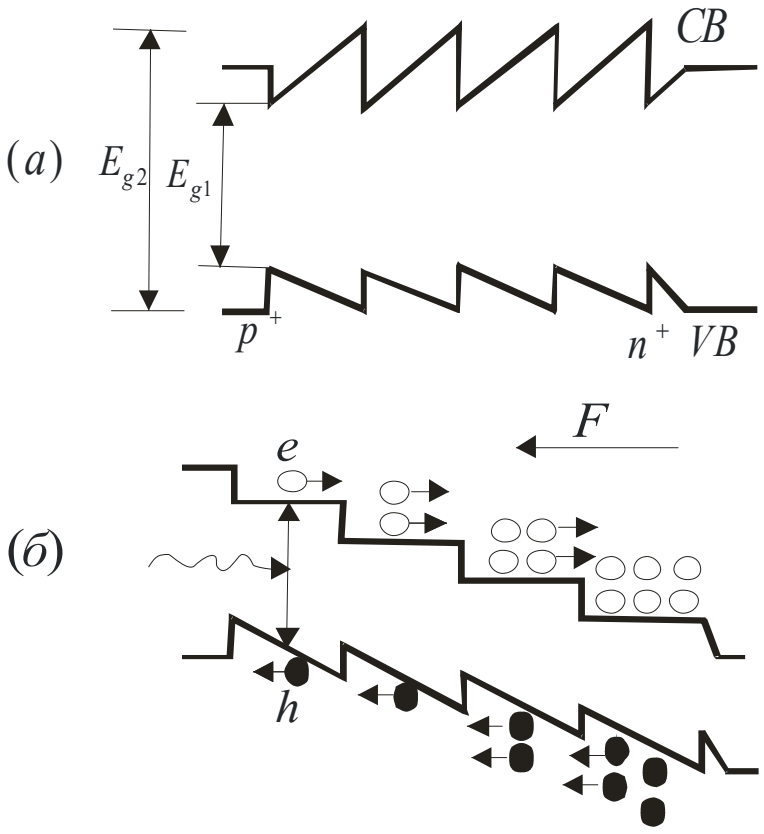
У верхній частині (рисунок 2.2, а) представлені два енергетичних рівня в кожній ямі, причому другий рівень розташовується близько до вершини бар'єрів. Відстань між рівнями має становити 0,1 0,2 еВ, що для напівпровідників $A_{III}B_V$ відповідає ширині ям близько 10 нм. Через правил відбору поляризація падаючого випромінювання повинна бути паралельна напрямку квантової локалізації. При опроміненні світлом такі фотодетектори генерують струм завдяки тунелювання носіїв з квантових ям. У деяких випадках найбільш ефективним методом реєстрації подається використання в таких пристроях поглинання переходів між єдиним енергетичним рівнем ями і першої вузької безперервної зоною поза нею (рисунок 2.2, б). для систем $AlGaAs-GaAs-AlGaAs$ ця різниця енергій становить близько 0,12 еВ, внаслідок чого область спектральної чутливості розташована в районі 10 мкм. Перевага використання описуваних структур пов'язано з тим, що темневим струм фотодетектора виявляється менше, ніж в раніше описуваних структурах, де носії залишають ями завдяки тунелювання.

Відомо, що при роботі так званих напівпровідникових лавинних фотодетекторів (ЛФД) виникають дуже сильні шуми, що вимагають застосування спеціальних методів для їх придушення. Рівень цих шумів може бути значно знижений, якщо значення коефіцієнта лавинного множення α для одного типу носіїв (наприклад, електронів) набагато вище, ніж для іншого (дірок). В цьому відношенні кремній є дуже важливим напівпровідникових матеріалом для створення ЛФД, так як в ньому співвідношення коефіцієнтів α_e/α_h дорівнює приблизно тридцяти. Для будь-якого конкретного типу напівпровідників це співвідношення визначається енергетичною зонною структурою.

З іншого боку, процес створення квантових ям дозволяє варіювати співвідношення коефіцієнтів α_e/α_h. Наприклад, надгратка або структура з множинних квантових ям MQW може бути спроектована таким чином, що в ній розрив зони провідності ΔE_c буде значно вище значень ΔE_V, Відповідних розриву валентної зони. У такій структурі (при перетині гетеропереходу)

електрони набувають значно більшу кінетичну енергію, ніж дірки. Така ж мета може бути досягнута при створенні надграток у вигляді сходинок (рисунок 2.3, а)

Ширина забороненої зони змінюється для кожної ями (в цьому випадку електрони отримують додаткову кінетичну енергію ΔE_c, Переходячи в кожну наступну яму). Наявність цієї надлишкової енергії призводить до вельми ефективним механізмам ударної іонізації, тому лавинне множення легко досягається при накладенні електричного поля F, Як показано на рисунку 2.3, б.



а - енергетична діаграма ступеневої типу;

б - процес наростання електронної лавини в детекторі зі зміщенням при потраплянні світла

Рисунок 2.3 — Загальна схема лавинних фотодетекторів з наноструктурами

На противагу цьому дірки набувають в поле лише незначну енергію ΔE_V, Недостатню для початку ударної іонізації. Більшість надграток,

використовуваних в лавинних фотодетекторах (APD), створено на основі напівпровідникових з'єднань класу $A_{III}B_V$ типу $GaAs$ або InP. Варто відзначити, що впровадження згаданих вище східчастих надграток ускладняється труднощами їх виготовлення, оскільки виробництво вимагає ретельного контролю складу четверні з'єднань $A_{III}B_V$.

Виходячи з прийнятих в завданні до атестаційної роботи ширини кожного квантово-обмеженого шару і хімічного складу кожного шару, а так само нехтуючи впливом об'ємного заряду в активній області діода, на підставі формул, наведених в підрозділі 1.1 можна побудувати енергетичну діаграму надгратки активної області, показану на рисунку 2.4. Тут же показана (пунктирна горизонтальна лінія) середня енергія падаючих на структуру частинок (електронів).

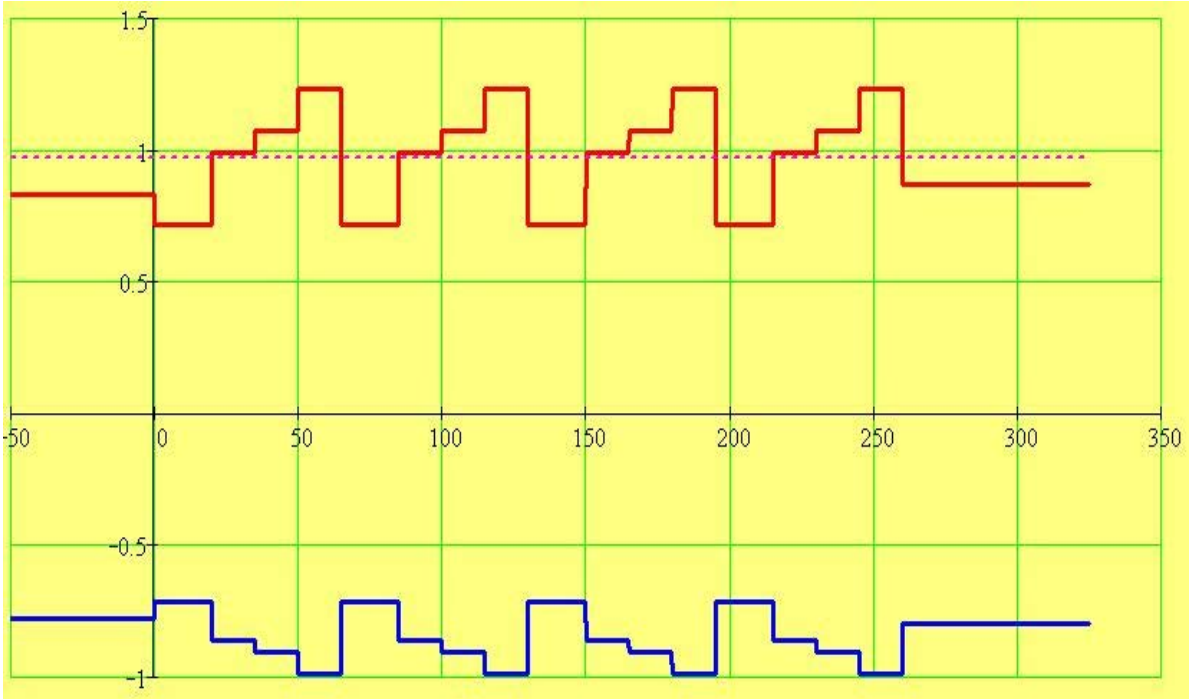


Рисунок 2.4 — Енергетична діаграма зонної структури в стаціонарному стані

Рішення системи (2.28) щодо вільних коефіцієнтів для заданої енергії падаючих частинок дозволяє, використовуючи систему (2.29) побудувати систему власних функцій падаючих частинок і щільності ймовірності їх

розподілу по активній області діода. На рисунку 2.5 показаний вид зони провідності активної області, середня енергія падаючих частинок і густина ймовірності їх розподілу (квадрат модуля хвильової функції).

Рисунок 2.5 — Вигляд реальної частини хвильової функції, уявної частини і квадрата модуля в стаціонарному стані

Виходячи з аналізу виду хвильової функції, наведеного на рисунку 2.5, розрахованих для стаціонарного стану (режиму роботи фотодіода як сонячного елемента, у відсутності зсуву), носії, в результаті відображення локалізуються в області бар'єрів і перед ними. У той же час, набуваючи в кожній з бар'єрних

областей додаткову потенційну енергію рівну висоті потенційного бар'єру частка отримує можливість подальшого тунелювання і локалізації в наступному бар'єрі.

При додатку до структури зовнішнього зміщення енергетична діаграма викривляється під дією зовнішнього поля і проти його силових ліній. Така зміна для досліджуваної структури показано на рисунку 2.6.

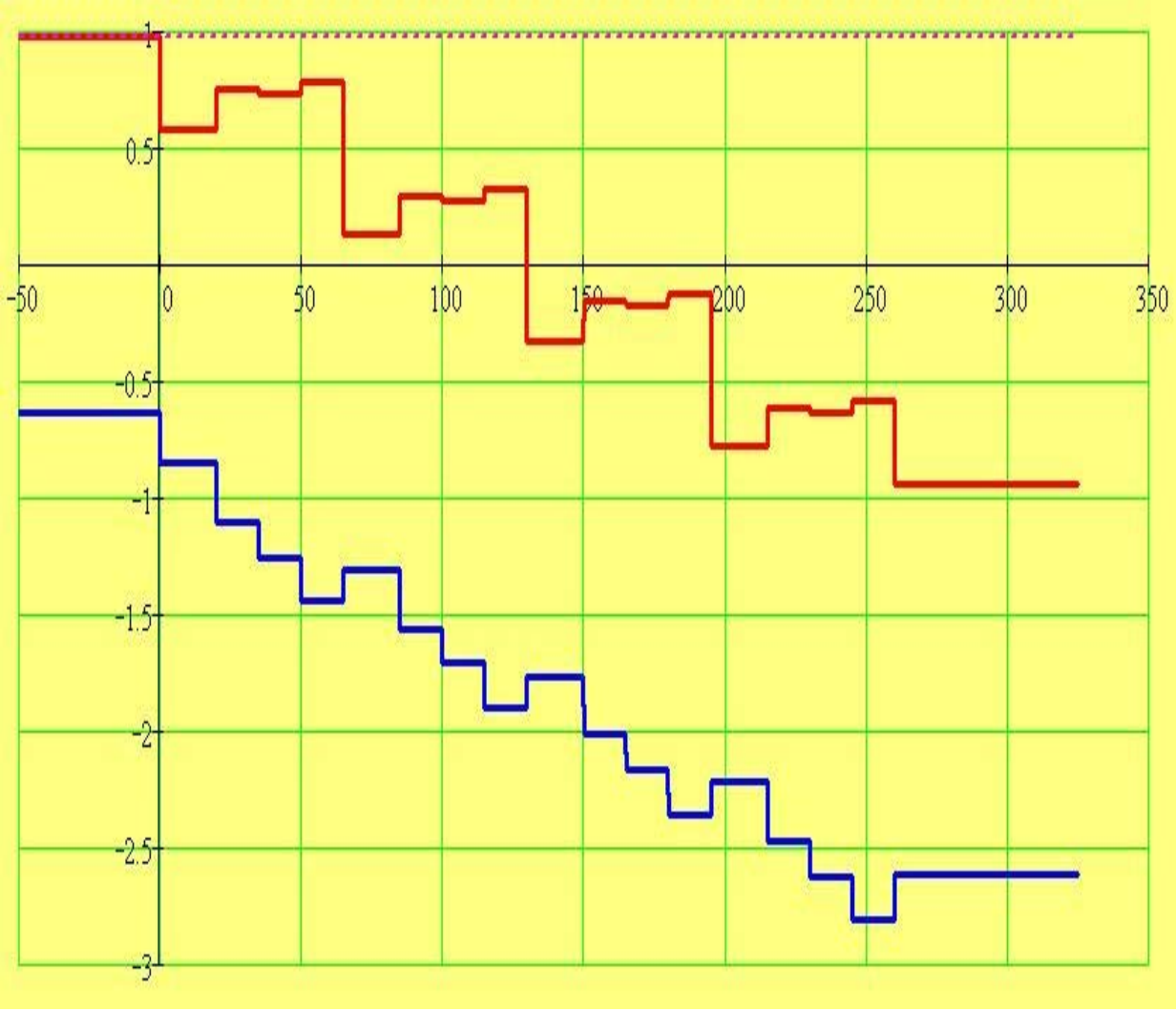


Рисунок 2.6 — Енергетична діаграма структури під дією зовнішнього поля

На рисунку 2.7 показано відповідне ненульова зовнішньому зміщення перерозподіл координатної залежності реальної та уявної частини хвильової функції, і квадрата її модуля. Зменшення (в порівнянні зі стаціонарним станом,

Рисунок 2.5) амплітуди реальної частини хвильової функції і зростання уявної її частини, свідчить про збільшення втрат на відбиття, для обраної середньої енергії носіїв.

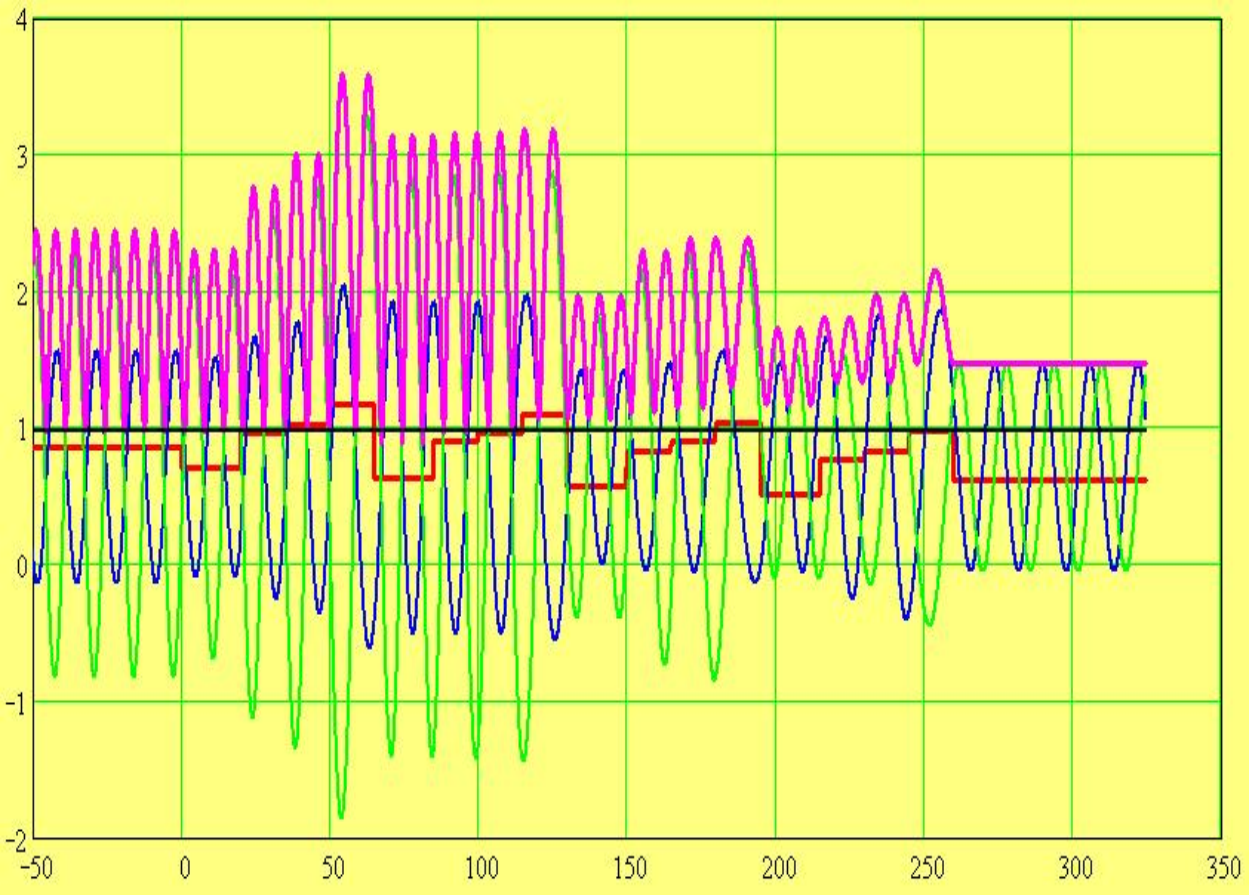


Рисунок 2.7 — Вигляд реальної частини хвильової функції, уявної частини і квадрата модуля під дією зовнішнього поля

Про істотній зміні прозорості структури свідчать також і діаграми коефіцієнті відбиття (рисунок 2.8) і прозорості (рисунок 2.9) розраховані для стаціонарного стану і аналогічні діаграми коефіцієнтів відбиття (рисунок 2.10) і прозорості (рисунок 2.11), розраховані для випадку, включення зовнішнього зміщення.

Діаграми коефіцієнтів відбиття і прозорості є комплементарними і в стаціонарному стані в сумі не перевищують одиниці. Максимуми на діаграмі

коефіцієнта відбиття, і відповідно, мінімуми на діаграмі коефіцієнта прозорості відповідають досить широким областям енергій частинок для яких туннелювання заборонено при заданій конфігурації енергетичної діаграми надгратки.

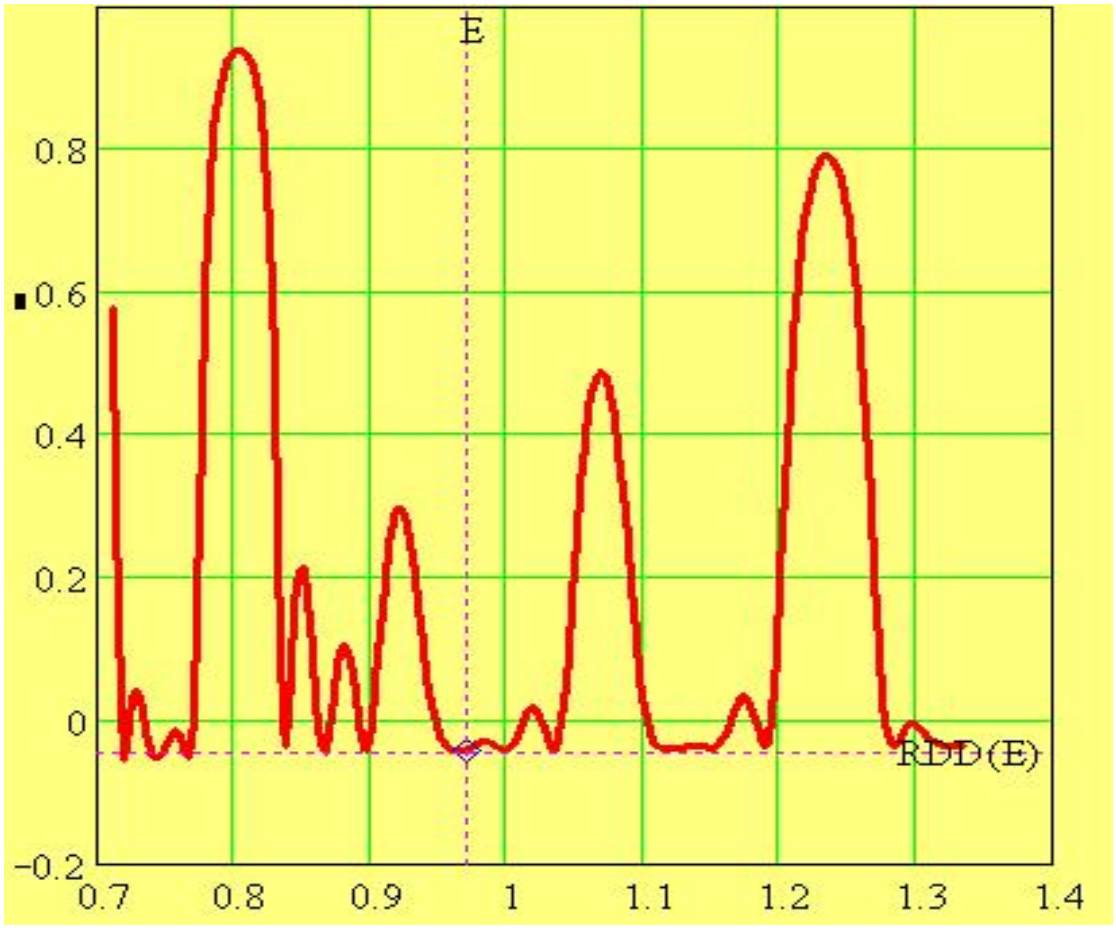


Рисунок 2.8 — Коефіцієнт відбиття в стаціонарному стані

Відповідно для режиму сонячної батареї в залежності від розв'язуваної конкретним фотоприймачем завдання, можна домогтися або щодо високого струму, що протікає в навантаження завдяки високій прозорості структури, або майже повністю придушити його за високої відбивної здатності структури для певних енергетичних частинок. Таким чином з'являється додаткова можливість селекції випромінювання, що приймається по енергії падаючих квантів.

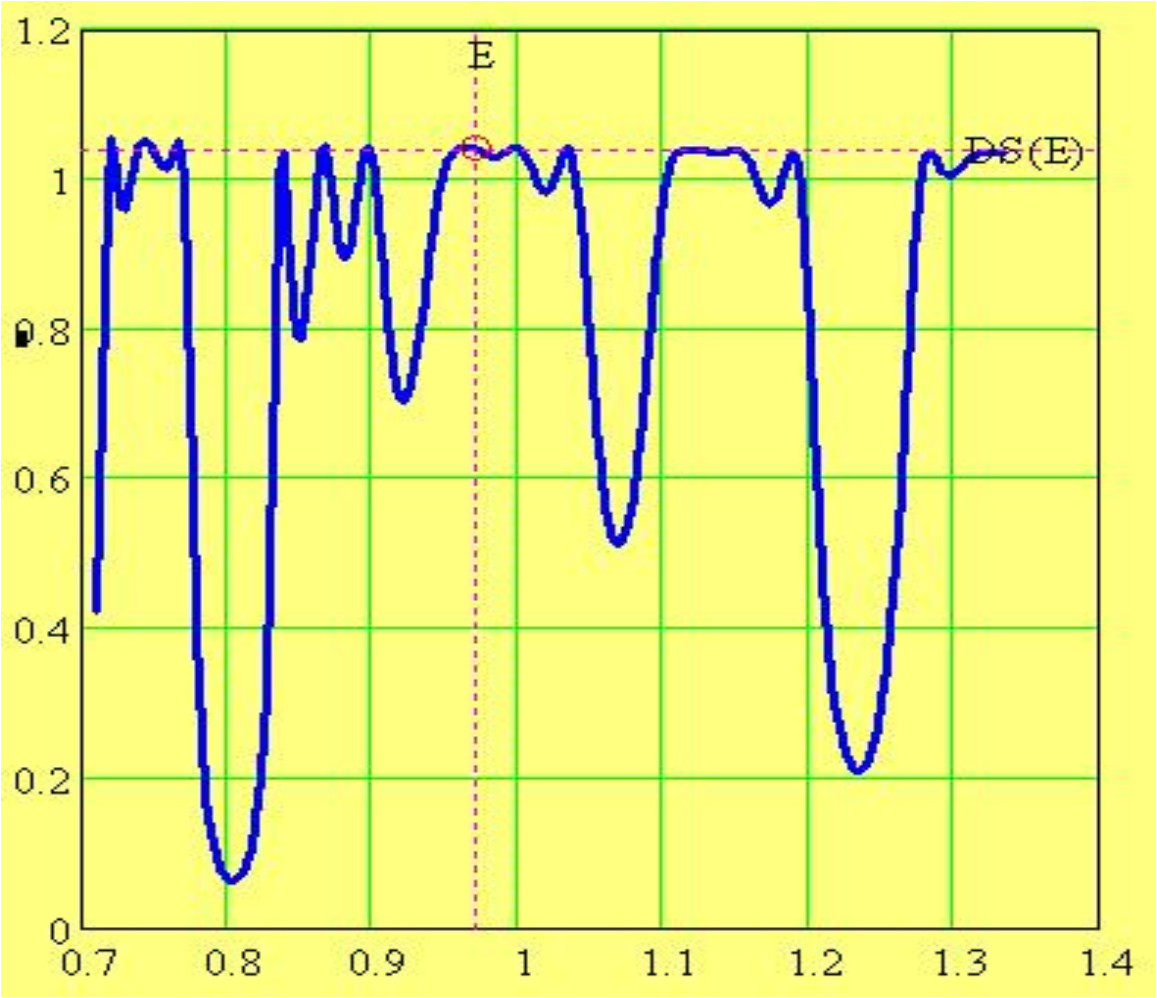


Рисунок 2.9 — Коефіцієнт прозорості в стаціонарному стані

Вплив зовнішнього зміщення на коефіцієнти відображення і прозорості показані на рисунках 2.10 і 2.11 відповідно, виражається в збільшенні коефіцієнта відбиття (зменшенні коефіцієнта прозорості) для частинок з малою енергією. Для частинок з великою енергією прозорість структури немонотонно зростає, що має забезпечити відносно легке формування лавини і збільшення струму через прилад. На всьому проміжку зміни потенційної енергії структури збільшенням поля зміщення все більш виразно проявляються вузькі піко подібні ділянки прозорості, що з одного боку свідчить про зміну спектра прозорості структури, з іншого про збільшення енергії носіїв, під дією зовнішнього поля.

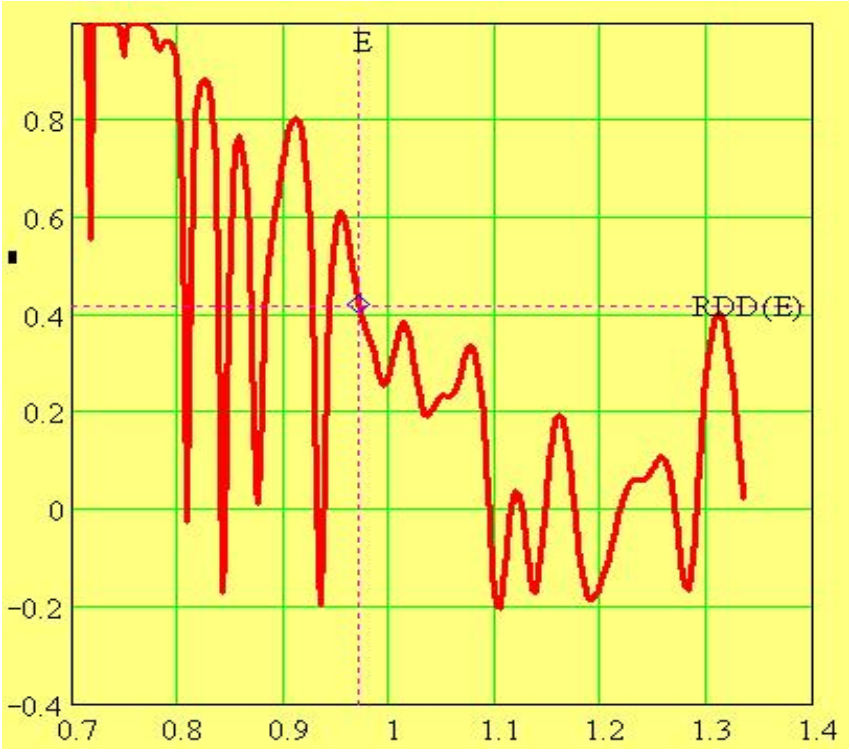


Рисунок 2.10 — Коефіцієнт відбиття багатошарової наноструктури під дією зовнішнього поля

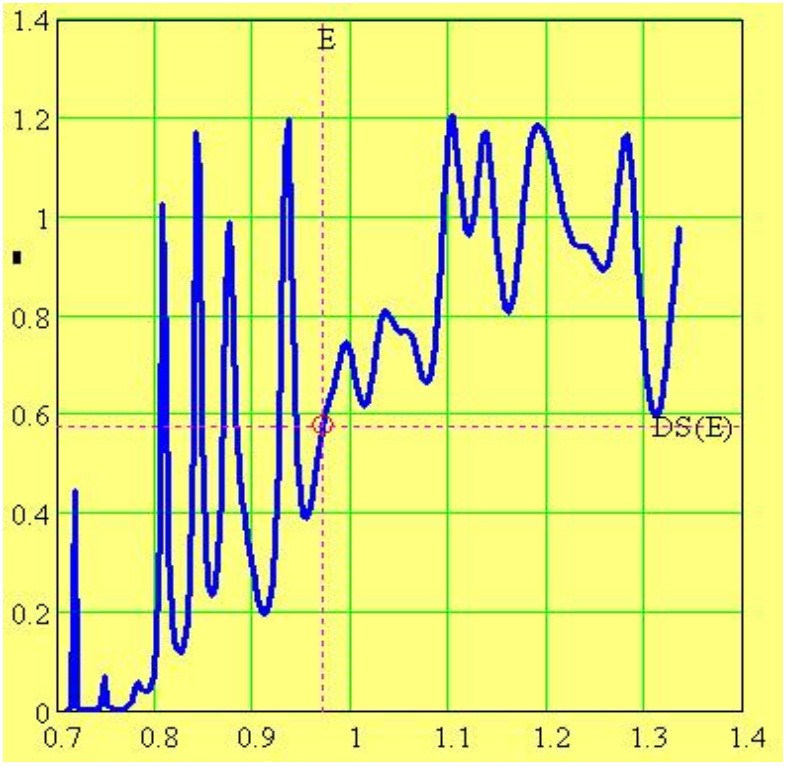


Рисунок 2.11 — Коефіцієнт прозорості багатошарової наноструктури під дією зовнішнього поля

ВИСНОВКИ

Отже, за результатами розрахунків прозорості надграток в активній області лавинних фотодіодів можна стверджувати наступне.

Надградки зі складною періодичною структурою енергетичної діаграми можуте бути досить прозора навіть без зовнішнього зміщення і використовуватися в режимі сонячної батареї.

Наявність вузьких піків в спектр і коефіцієнта прозорості свідчить про можливість частотної селекції прийнятого випромінювання.

Зовнішній зсув призводить до істотної зміни прозорості структури таким чином, що носії з високою енергією породжувані лавиною отримують переважні умови поширення по структурі, а значить і збільшення струму, що протікає.

Наявність бар'єрної структури у валентній зоні для дірок призводить до їх часткового пере відбиття при наявності зовнішнього зміщення, що має зменшити шумовий струм приладу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Андреев В.М. Нанотехнологии для солнечной фотоэнергетики.// Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (АЭЭ), 2007.№ 2(46). С. 93-98.

2. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективыразвития солнечной фотоэнергетики. //ФТП, 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.

3. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: БГУ, 2007.

4. Андреев В.М. Солнечные дни. Неистощаемый ресурс. // URL:http://www.stroygorhoz.ru/en8/30.php/. Дата обращения: 14.02.2011.

5. Солнечная энергетика России: перспективы и проблемы развития.// URL:http://www.gisee.ru/articles/solar-energy/24510/. Дата обращения: 14.07.2012

6. Мешков П.И. Наноматериалы в солнечных батареях – новые перспективыальтернативной энергетики.// NanoNewsNet: сайт о нанотехнологиях в России.2009. URL: http://www.nanonewsnet.ru/articles/2009/ nanomaterialy-vsolnechnykhbatareyakh-novye-perspektivny-alternativnoi-energe- tiki. Дата обращения: 21.03.2011.

7. Самсонов Е. Перспективы солнечной энергетики США.//Биржевой Лидер.Новости и аналитика инвестиций Masterforex, 2010.URL:http://www.profiforex.org/country_traders/entry1005281809.html. Дата обращения: 14.02.2011.

8. Возобновляемые источники энергии. // URL: http://ru.wikipedia.org. Датаобращения: 14.02.2011.

9. Карабанов С. Солнечная энергетика: современное состояние и перспективы

развития // Живая электроника России. 1999. С. 78–81.

10. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.:

Энергоатомиэдат, 1987.

11. Достанко А.П., Василевич В.П., Кайдов О.Л. //Тенденции и перспективыразвития технологии производства поликристаллического кремния для фотоэлектрических преобразователей. Доклады БГУИР, 2006, №1. С. 73–80.

12. Медведкин Г.А., Теруков Е.И. и др. Фотолюминесцентные свойства поликристаллических солнечных элементов ZnO/CdS/CuInGaSe2 при низкой температуре.// ФТП, 2001. Т. 35. Вып. 1. С. 1385-1390.

13. Солнечная энергетика. Сайт компании ЗАО «СуперОкс»// URL:http://www.superox.ru/photoelements3.htm. Дата обращения: 12.11.2011.

14. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Полупроводниковые фотопреобразователидля ультрафиолетовой области спектра. //ФТП, 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025–1055.

15. Жук Г. Фотоэлементы – энергоальтернатива. // URL: http://www. digimedia.ru/articles/compyutery/raznoe/tehnologii- buduschego / fotoelementy - energoalternativa. Дата обращения: 12.01.2012.

16. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.2. М.: Мир, 1984.

17. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990.

18. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. Петрозаводск:ПетрГУ, 2004.

19. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника: Учеб. для вузов.М.: Высшая школа, 1986.

20. Шиляев П.А., Павлов Д.А. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009.

21 Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. СПб.: Наука, 2000.

22. Кардона Ю. П. Основы физики полупроводников / Пер. с англ. И.И. Решиной. / Под ред. Б.П. Захарчени. – 3-е изд. М.: Физматлит, 2002.

23. PVCDROM ChristianaHonsberg и StuartBowden. //Учебная программа поосновам солнечной энергетики. URL: http://pvcdrom. pveducation.org/RU/ Датаобращения: 14.01.2012.

24. Фролкова Н. О. Моделирование солнечных батарей на основе различных

полупроводников: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2011.

25. Ермолаева Н.В., Смолин А.Ю., Литвин Н.В. Фотопреобразователисолнечной энергии: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. −228 с.

26. Аморфные и поликристаллические полупроводники: Пер. с нем./ Под ред.В. Хейванга. М.: Мир, 1987.

27. Аморфные полупроводники: Пер. с англ./ Под ред. М. Бродски. М.: Мир,1982.

28. Аморфные полупроводники и приборы на их основе: Пер. с англ./ Подред. Й. Хамакавы. М.: Металлургия, 1986.

29. Budaguan B.G., Sherchenkov A.A., Chernomordic Y.D., Biriukov A.Y., Ljungberg. a-Si:H/c-Si heterostructures prepared by 55 kHz glow discharge high-rate deposition technique. // J. of Non- Cryst. Solids, 1998. V. 227–230. P. 1123-1126.

30. Мейтин М. Пусть всегда будет Солнце! //Электроника: Наука. Технология.Бизнес, 2000. № 6. С.40-46.

31. Kroon M.A., van Swaaij R.A.C.M. M, Zeman M, Metselaar J.W. Study of the Design of the a-Si:H.Tansverse Junction Solar Cell. //Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.

32. Круковский С.И., Николаенко Ю.Е. Солнечные элементы на основетандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs //Технология и конструированиев электронной аппаратуре, 2003. № 6. С. 39–40.

33. Olson J. M., Kurtz S. R., Kibbler K. E. InGaP as material for the topsolar cells // Appl. Phys. Lett., 1990. V. 56. № 7. P. 623-625.

34. Yamaguchi Masafumi. Physics and techologies of super-high-efficiency tandem solar cells//ФТП, 1999. Т. 33. Вып. 9. С. 1054–1058.

35. Николаенко Ю. Е., Круковский С. И., Завербный И. Р. и др. Получениетандемных гетероструктурGaAs-InGaAs-AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2002.№ 3. С. 27–29.

36. Кулюткина Т.Ф., Марончук Н.И. и др. Сверхвысокоэффективные солнечные элементы (краткий обзор) // Новітехнології, 2011. № 3 (33). НауковийвісникКУЕІТУ, С. 9-16.