

**Наукова робота на тему:**

**«Формування одинарної квантової точки InAs у структурі  
гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs CVD - методом»**

**Шифр: GSK 2018**

Національний університет «Львівська політехніка»

Автор: Галан Іван Ростиславович

Керівник: Губа Сергій Костянтинович, к.т.н., доцент кафедри  
напівпровідникової електроніки

## **Анотація**

У даній роботі було розглянуто теоретичні засади хлорид – гідридної епітаксії, процеси формування краплі золота, росту ниткоподібного кристалу GaAs, росту квантової точки InAs. Описаний технологічний маршрут для формування одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs – GaAs CVD - методом. Було оцінено основні технологічні параметри росту даної структури. А також оцінено час, який потрібно затратити на технологічний процес формування одинарної квантової точки In As в структурі гетеронановіскера.

## **Annotation**

In this work considered the theoretical bases of CVD – method, processes of forming droplets gold whiskers growing GaAs, InAs quantum dot growth. Described technological route for the formation of a single InAs quantum dot structure heteronanoviskera in GaAs - InAs - GaAs by CVD. It was estimated basic technological parameters of growth of the structure. Also estimated time needed to spend on technological process of forming a single AsIn quantum dot structure in heteronanoviskera.

## Зміст

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                                                                                                                | 3  |
| 1. Застосування квантових точок InAs у структурі гетеронановіскера GaAs –<br>KT InAs – GaAs.....                                                                                                          | 4  |
| Висновок та постановка задачі.....                                                                                                                                                                        | 5  |
| 2. Розрахунок та оптимізація технологічних параметрів росту одинарної<br>квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - KT InAs - GaAs<br>CVD – методом                                        |    |
| 2.1. Формування пересиченої газової фази в багатоканальному реакторі для<br>росту квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - KT InAs -<br>GaAs CVD – методом.....                          | 8  |
| 2.1.1. Конструкція та принцип роботи багатоканального<br>реактора.....                                                                                                                                    | 8  |
| 2.1.2. Формування пересиченої газової фази для отримання GaAs та<br>InAs.....                                                                                                                             | 10 |
| 2.2. ПРК - механізм росту квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера<br>GaAs - KT InAs - GaAs CVD – методом.....                                                                                  | 12 |
| 2.2.1. Формування нанорозмірної краплі Au на підкладці GaAs.....                                                                                                                                          | 13 |
| 2.2.2. Опис росту нановіскера GaAs із краплі Au по ПРК – механізму для CVD -<br>методу.....                                                                                                               | 14 |
| 2.2.3. Ріст одинарної квантової точки InAs.....                                                                                                                                                           | 18 |
| 2.3. Розрахунок параметрів технологічного маршруту росту гетеронановіскера<br>GaAs – KT InAs – GaAs для CVD – методу.....                                                                                 | 20 |
| 2.4 Технологічний маршрут росту одинарної квантової точки InAs у структурі<br>гетеронановіскера GaAs – KT InAs – GaAs в багатоканальному прямоточному<br>реакторі методом хлорид-гідридної епітаксії..... | 30 |
| Висновок.....                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Список літератури.....                                                                                                                                                                                    | 32 |

## Вступ

Концепції, які передували нанотехнології, було вперше обговорено 1959 року, фізиком Річардом Фейнманом у його промові *There's Plenty of Room at the Bottom*, у якій він змалював можливість синтезу, за допомогою прямого маніпулювання атомами.

Саме у наш час наноб'єкти починають знаходити широке застосування. Під цими об'єктами ми розуміємо такі, що як мінімум в одному напрямку мають розмір 1 - 100 нм, а саме нановіскер, квантова яма, квантова точка (КТ), квантова потенціальна антиточка та інші.

Із ідей застосування КТ і нановіскерів реалізовано:

- нановіскери - як сенсор вірусів.
- КТ – як одинарний пік сель у телевізійних екранах.
- КТ використовуються в структурі лазерів.
- КТ та нановіскери є основними елементами у діодах і МДН - транзисторах, що формуватимуть майбутній вигляд електроніки.

Технологія отримання нановіскерів дає можливість отримувати масив однорідних об'єктів. Це в свою чергу робить кожен нановіскер як самостійним елементом техніки, так і складовою різних схем. Але з квантовими точками все навпаки. Наявні технологічні методи дають можливість створити масив квантових точок, але вони будуть неоднорідними. Тому в техніці ми можемо користуватися тільки певним масивом КТ, характеристики якого будуть достатньо відтворюваними.

Дана робота ставить собі за мету формування теоретичної бази для створення у майбутньому одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs - GaAs CVD – методом, а також оптимізація цього процесу.

## **1. Застосування квантових точок InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs**

Через свою квазі-нульвимірність квантові точки характеризуються піками густини станів на дискретних рівнях, на відміну від структур із більшою розмірністю. В результаті, вони мають поліпшені оптичні властивості, і досліджуються для використання в діодних лазерах, підсилювачах, і біологічних сенсорах.

Квантові точки швидко проторили шлях в людські оселі як частина багатьох електронних пристроїв. Нова PlayStation 3 і нові програвачі DVD використовують блакитний лазер для зчитування даних. Блакитний напівпровідниковий лазер ще кілька років тому вважали за щось неможливе, аж поки не було розроблено лазер на квантових точках.

Квантові точки — один із багатонадійних кандидатів для твердотілого квантового обчислення. Застосовуючи маленькі напруги до керування, можливо керувати потоком електронів через квантову точку, і таким чином точно вимірювати їхні спіни та інші властивості.

Квантовий комп'ютер, імовірно, можна реалізувати на системі з кюбітами у вигляді квантових точок, встановивши відповідні контакти для пересилання інформації між ними.

Досліджуються й інші застосування переднього краю для квантових точок: потенційний штучний флюорофор для інтра-операційного виявлення пухлин, використовуючи спектроскопію флюоресценції.

У сучасному біологічному аналізі, використовують різні види органічних барвників. Проте, щороку зростає потреба в ширшому виборі їхніх кольорів, і традиційні барвники іноді просто не в змозі задовільнити необхідні норми. Тому квантові точки швидко заповнили цю нішу, перевершуючи традиційні органічні барвники за добором властивостей — їх яскравість (унаслідок високого квантового виходу), стабільність, вузькість спектральних смуг і низька токсичність (зараз досліджується).

Нещодавно відкрито, що квантові точки можуть виробляти три електрони від одного високоенергетичного фотона сонячного світла, коли сьогоdnішні фотоелектричні батареї поглинають фотон сонячного світла, енергія перетворюється на принаймні один електрон, а решта втрачається, розсіюючись у тепло. Використання квантових точок могло б підвищити ефективність сьогоdnішніх сонячних батарей від 20-30 % до 65 %.

Інша робота виявила, що кристали кадмію і селену певного розміру випускають біле світло, коли збуджуються ультрафіолетовим лазером. Здається, ця емісія виходить з поверхні кристала, замість центру. Кристали містять або 33, або 34 пар атомів. Якщо вони синтезуються піролітично, вони звичайно формують кристали тільки цього розміру, отже великі масиви таких кристалів можуть бути зроблені зараз. У іншому експерименті ці квантові точки були змішані в звичайному лаку, що привело до жовтувато-білої емісії подібної до світла звичайної лампи розжарювання. Дослідники вважають, що буде можливо досягти емісії білого світла через електричне стимулювання, крім фотонного [1].

### **Висновок та постановка задачі**

Гетероструктури з просторовим обмеженням носіїв заряду в усіх трьох напрямках (квантові крапки) реалізують граничний випадок розмірного квантування в напівпровідниках, коли модифікація електронних властивостей матеріалу найбільш виражена. Всі найважливіші для застосувань характеристики матеріалу, наприклад час випромінювальної рекомбінації, коефіцієнти оже-рекомбінації тощо виявляються кардинально залежними від геометричного розміру і форми квантової крапки.

Якісний прорив в цій галузі зв'язаний з використанням ефектів самоорганізації напівпровідникових наноструктур в гетероепітаксійних напівпровідникових системах з утворенням квантових точок. Таким чином було реалізовано гетеронаноструктури  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{InAs}/\text{GaAs}$  з квантовими точками  $\text{InAs}$  високої кристалічної досконалості, високим квантовим виходом випромінювальної рекомбінації і високою однорідністю щодо розмірів (близько

10%) у напівпровідникових інжекційних лазерах. В той же час напівпровідникові гетеронановіскери, або ниткоподібні кристали нанометрового діапазону (ННК), стають останнім часом предметом підвищеного інтересу як з фундаментальної, так і прикладної точок зору. Завдяки надзвичайно ефективній релаксації пружних напружень на бічній поверхні, у віскерах можливе вирощування когерентних гетероструктур осьового типу в сильно неузгоджених системах матеріалів, що якісно відрізняє віскери від двовимірних шарів.

На цей час вже розроблено низку технологій і методик які ефективно функціонують і забезпечують отримання наноструктурованих матеріалів для лазерного використання. Це, насамперед, молекулярно-променева та МОС-гідридна епітаксія. Тут ми акцентуємо на газотранспортній низькотемпературній хлорид-гідридній епітаксії (CVD-метод), як засобі формування напівпровідникових квантово-розмірних структур. Цікавими властивостями володіють гетеронановіскери із квантовими крапками, що ростуть масивом. Він є неоднорідним, що не дає можливості встановити залежність властивостей КТ від її розмірів та форми. Для встановлення такої залежності було поставлене завдання дослідити кінетику формування одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs - GaAs низькотемпературним CVD - методом.

Метою даної роботи було розробити модельні уявлення формування одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs - GaAs низькотемпературним CVD – методом на базі роботи [2].

Постановка задачі для даної роботи полягає в :

- а) розробка модельних уявлень кінетики формування одинарної квантової точки у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs – GaAs для низькотемпературним CVD – методу;
- б) отриманні характеристичних залежностей параметрів росту гетеронановіскерів GaAs – КТ InAs – GaAs від технологічних умов росту;

в) Розрахунок параметрів технологічного маршруту росту гетеронановіскера GaAs – KT InAs – GaAs для CVD – методу;

г) Розробка технологічного маршруту росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – KT InAs – GaAs в багатоканальному прямоточному реакторі CVD - методом

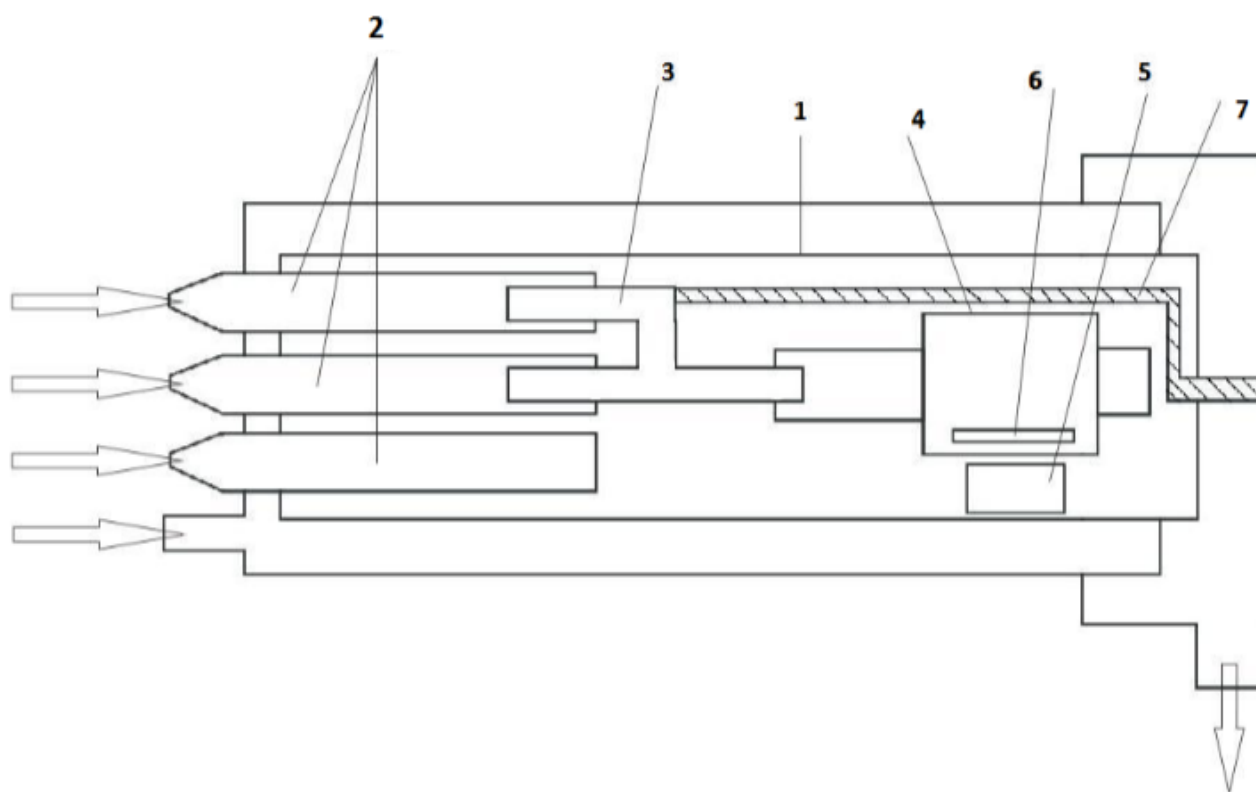


## **2. Розрахунок та оптимізація технологічних параметрів росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - K<sub>T</sub> InAs - GaAs CVD – методом**

### **2.1. Формування пересиченої газової фази в багатоканальному реакторі для росту квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs - GaAs CVD - методом**

#### **2.1.1. Конструкція та принцип роботи багатоканального реактора**

CVD - метод це метод який на даний момент розвивається. Технологічний комплекс складається з багатоканального реактора, блоку формування газової суміші, реактора та резистивного нагрівача реактора.



**Рис. 2.1. Продовжний вигляд багатоканального реактора для вирощування багатошарових гетероепітаксійних напівпровідникових структур[3]**

Багатоканальний реактор (рис. 2.1.) складається із наступних елементів:

1. Корпус.
2. Одноканальні реактори з штуцерами для введення газу.

3. Комутаційний вузол.
4. Проточна ростова камера.
5. Кріплення ростової камери.
6. Підкладкотримач.
7. Герметичне введення обертового та поступового руху.

Епітаксійний ріст відбувається наступним чином. В одноканальні реактори 2 подаються газові потоки. З допомогою комутаційного вузла 3 газові потоки з ростовими та легуючими компонентами з реактора 2 направляються в проточну ростову камеру 4, де знаходиться підкладкотримач 6 з підкладками. При проходженні газової суміші на підкладках відбувається епітаксійний ріст. Відпрацьовані гази виходять з камери 4 та попадають в порожнину корпусу 1, звідки виходять в атмосферу. Кріплення 5 забезпечує нерухомість проточної ростової камери в процесі перемикання комутаційного вузла від одного реактору до другого з метою зміни складу газового потоку. Газовий потік з реактору, який є не підключений до комутаційного вузла 3, надходить безпосередньо в порожнину корпусу 1 і виходить з неї в атмосферу, минувши підкладки. Комутаційний вузол 3 забезпечує доступ до підкладок тільки тих ростових компонентів, які необхідні в даний момент росту, а стінки проточної ростової камери 4 відділяють підкладки від порожнини корпусу з газовою сумішшю некеруючого складу.

Елементи реактора виконані з кварцу марки КВ-1. Корпус виготовлений з труби, діаметром 80 мм та довжиною 850 мм. На вході в реакторі вмонтовані сім трубок з зовнішнім діаметром 15 мм та довжиною 210 мм. Ці трубки представляють собою сім одноканальних реакторів, в які незалежно подаються газові суміші через відповідні зовнішні штуцери. В реакційній зоні формування газової суміші розміщаються джерела Ga, In. Ростова проточна камера представляє собою канал довжиною 150 мм з внутрішнім прямокутним січенням 35-30мм. Підкладкотримач представляє собою профільовану пластину. Її максимальна товщина близька до внутрішньої висоти камери і має канавки глибиною 3 мм для кріплення підкладок [3].

### 2.1.2. Формування пересиченої газової фази для отримання структури GaAs та KT InAs гетеронановіскера GaAs - KT InAs - GaAs CVD – методом

Для формування пересиченої газової фази потрібно забезпечити відповідний склад газової фази та її пересичення.

Склад газової фази на виході із зони джерела визначається кінетикою реакції і залежить не тільки від температури початкового складу хімічних реагентів, але і від поля швидкостей парового потоку в реакторі, його геометрії, площі джерела, профілю поля температури.

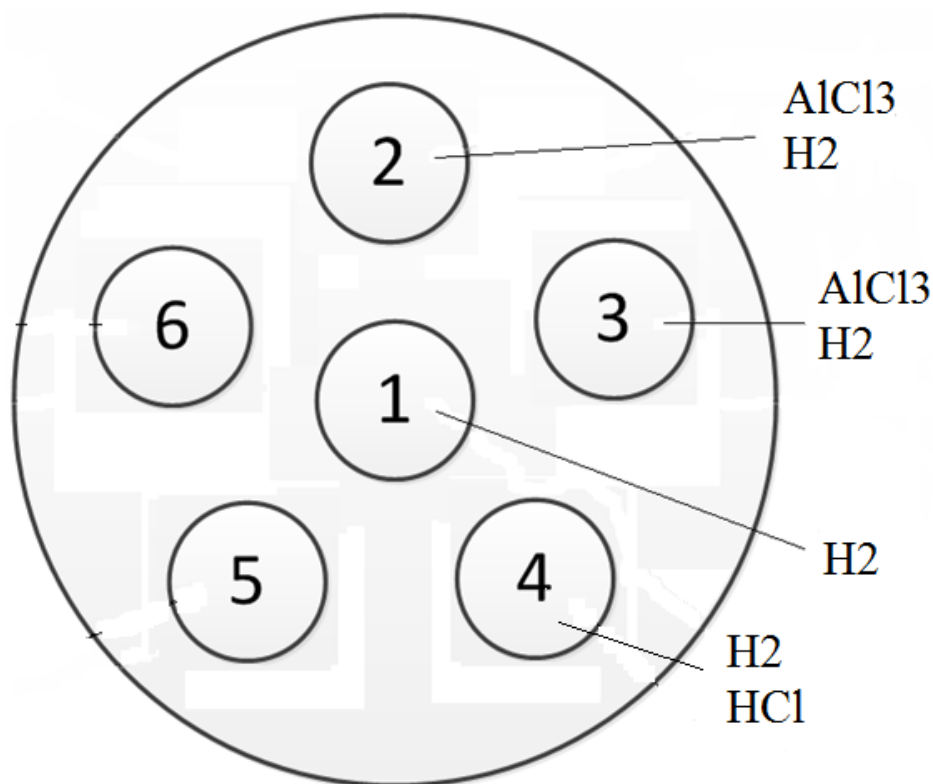
Для отримання гетеронановіскера варто забезпечити конструктивні умови для формування відповідних елементів структури GaAs – KT InAs – GaAs: Формування пересиченої газової фази для отримання нановіскера GaAs у структурі гетеронановіскера GaAs – KT InAs – GaAs. Для отримання арсеніду галію потрібно забезпечити певні умови. Джерелом буде слугувати Ga у, який знаходиться у другому одноканальному реакторі (рис 2.3). Через нього пропускатиметься суміш двох газів: AsCl<sub>3</sub> та H<sub>2</sub> (V<sub>H<sub>2</sub></sub> - газ – носій зі швидкістю 3 см/с), при температурі 1023<sup>0</sup> К (рис 2.2). При їх взаємодії з джерелом відбувається ряд хімічних реакцій:



Отже в результаті, на виході із джерела ми отримаємо суміш газів: GaCl, H<sub>2</sub> та As<sub>4</sub>, які й будуть формувати ріст ниткоподібного кристалу GaAs.

Формування пересиченої газової фази для отримання квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - KT InAs – GaAs.

Перед тим як отримати арсенід індію, потрібно протягом деякого часу продувати реактор воднем для того щоб реактор повністю очистився від галію та очислиась крапля золота.

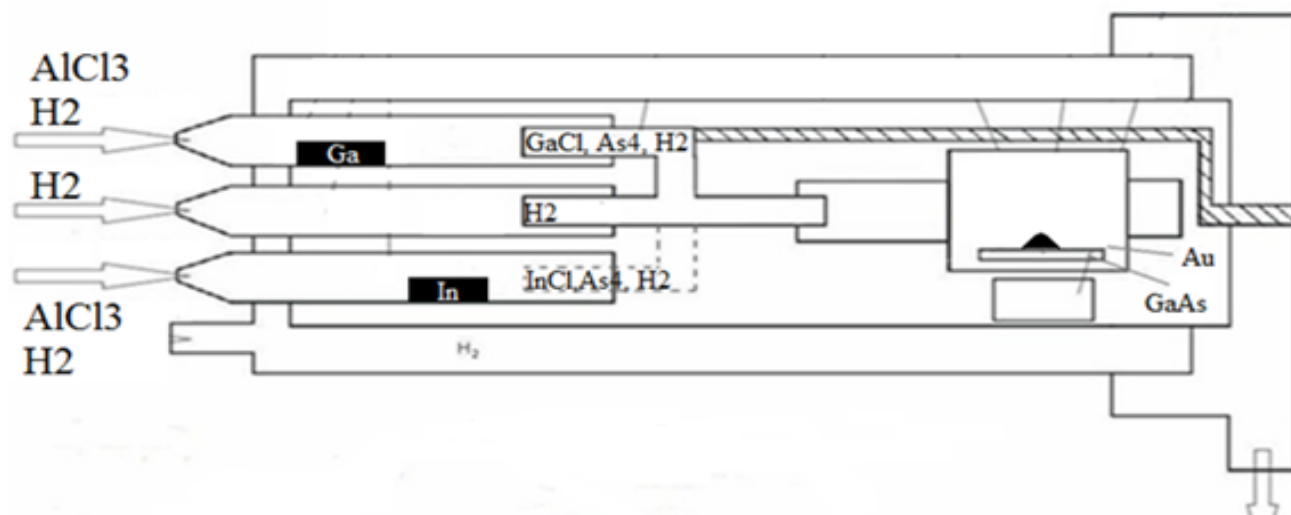


**Рис. 2.2. Поперечний переріз багатоканального прямооточного горизонтального реактора із розстановкою потоків газів у відповідні одноканальні реактори [3]**

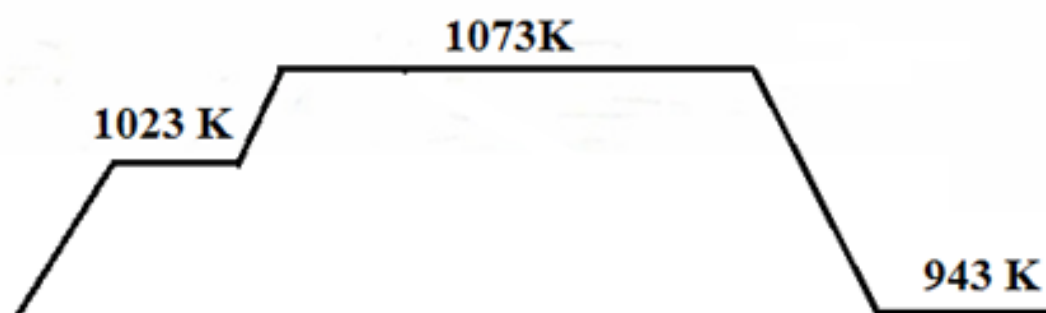
Аналогічно як до GaAs, потрібне джерело для росту квантової точки InAs буде In, що знаходитиметься у третьому одноканальному реакторі (рис. 2.3, рис. 2.4). У нього подаватиметься суміш газів:  $\text{AsCl}_3$  та  $\text{H}_2$  ( $V_{\text{H}_2}$  - газ – носій зі швидкістю 3 см/с), при температурі  $1073^0 \text{ K}$  (рис. 2.2). У джерелі відбуватимуться наступні реакції:



Отже ріст квантової точки InAs забезпечуватиметься сумішшю газів:  $\text{InCl}$ ,  $\text{H}_2$  та  $\text{As}_4$ , які й будуть формувати ріст гетеронановіскера GaAs - КТ InAs – GaAs.



**Рис. 2.3 Поперечний переріз багатоканального реактора з наповненням для отримання гетеронановіскера GaAs - КТ InAs - GaAs CVD – методом [3]**



**Рис. 2.4 Температурний профіль поля температур вздовж багатоканального реактора [3]**

## **2.2. ПРК - механізм росту квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs - InAs - GaAs CVD - методом**

Для формування одинарної квантової точки (КТ) InAs в гетероструктурі нановіскера GaAs-InAs-GaAs методом CVD потрібно провести ряд технологічних операцій:

1. Формування нанорозмірної краплі золота.
2. Формування нановіскера GaAs.
3. Вирощування КТ InAs на вершині отриманого нановіскера.

### 2.2.1. Формування нанорозмірної краплі Au на підкладці GaAs

У роботі розглядається вирощування нановіскера GaAs на поверхні, активованій металічним Au каталізатором. Такий метод був вперше продемонстрований 1964 року в роботі Вагнера і Елліса [4].

Дана робота показала, що в тих місцях, де знаходилися металеві краплі (Au) відбувався ріст ниткоподібних нанокристалів (ННК) з радіусом приблизно рівним радіусу краплі активатора, а ріст на не активованій поверхні майже відсутній. В результаті отримується одновимірний кристал, перпендикулярний до підкладки, довжина якого визначається параметрами росту.

Отже для отримання кристалу певного діаметру потрібно формувати на поверхні підкладки металеву краплю - активатор відповідного діаметру. У роботі [5] були сформувані основні вимоги до каталізатора росту:

- Каталізатор у рідкому стані не повинен змочувати напівпровідникову поверхню, що є необхідним для утворення тривимірних крапель і нуклеації ННК.
- Розчин каталізатора із напівпровідником повинен мати температуру топлення нижчу типових ростових температур.
- Розчин не повинен змішуватися у твердому стані, що відповідає кристалізації чистого напівпровідникового матеріалу без проникнення каталізатора в об'єм ННК.

В даній роботі каталізатором буде золото(Au), оскільки цей матеріал задовольняє умови, висунуті вище.

На практиці крапля - активатор не є однорідним золотом. Це повинен бути розчин металу і напівпровідникового матеріалу ННК, тобто розчин Au - GaAs.

Тому формування крапель - катлізаторів вимагає певних технологічних кроків:

- Нанесення буферного шару GaAs. Цей шар вирівняє нерівності нашої підкладки, а також буде джерелом GaAs для відповідного розчину краплі - активатора.
- Напилення шару золота товщиною  $d_{Au} \sim 1\text{ нм}$ . Для створення регулярного масиву ННК використовуються складніші методи підготовки каталізатора: електронна літографія, літографія “nanoimprint”, осадження малодисперсних колоїдних частинок.
- Відпал поверхні. Температура відпалу має бути більшою за евтектичну температуру плавлення.

В результаті ми отримаємо на підкладці краплі насиченого розчину Au - GaAs.

Оскільки було поставлене завдання сформувати одинарну структуру, то ми маємо мати лише одну краплю Au розтопу. Тому портібно достовірно знати скільки золота потрібно на формування однієї краплі розтопу.

У роботі [6] було отримано залежність радіусу краплі  $r$  від об'єму  $V$ :

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi f(\alpha)}} \quad (2.5)$$

де

$$f(\alpha) = \frac{(1 - \cos\alpha)^2(2 + \cos\alpha)}{\sin^3\alpha} \quad (2.6)$$

Оскільки радіус  $r$  та крайовий кут є відомими нам величинами, то ми можемо порахувати необхідку кількість Au для формування однієї краплі заданого радіусу [6].

### 2.2.2. Опис росту нановіскера GaAs із краплі Au по ПРК – механіму для CVD – методу

Ниткоподібний нанокристал GaAs росте за певним механізм, що визначає його розміри:

- 1) Механізм росту нановіскера GaAs на поверхні, активованій Au .

В початковий момент часу на поверхні знаходиться крапля насиченого розчину Au - GaAs, що знаходиться в рівновазі із підкладкою. В результаті осадження GaAs потрапляє у краплю. Потрапляння напівпровідникового матеріалу у краплю можливе різними шляхами:

1. Пряме потрапляння із газової фази.
2. Дифузія адатомів, осаджених на бокову поверхню, на вершину ННК.
3. Дифузія адатомів з поверхні підкладки через бокові стінки на вершину ННК.

При стаціонарному рості пересичення підтримується за рахунок балансу адсорбції - десорбції, дифузії та вертикального росту ННК. В результаті росте кристалічний стовбець з латеральним розміром, трішки меншим за діаметр краплі, а сама крапля рухається вгору зі швидкістю росту ННК. Більша швидкість росту із краплі, ніж на не активованій поверхні пояснюється двома факторами: збільшення швидкості хімічної реакції біля поверхні краплі(хімічний каталізатор) та “збирання” матеріалу із бокових стінок і поверхні підкладки за рахунок дифузійних потоків, спрямованих у краплю(фізичний каталізатор). Отже, при формуванні ННК GaAs зазнає два фазових перетворення: перехід пар - рідина та перехід рідина кристал.

Термодинамічною рушійною силою процесу росту є пересичення газової фази [5]:

$$\Phi = \exp\left(\frac{\Delta\mu_{VS}}{k_B T}\right) - 1 \quad (2.7)$$

де  $\Delta\mu_{VS} = \mu_V - \mu_S$  - різниця хімічних потенціалів пари( $\mu_V$ ) і підкладки( $\mu_S$ ),  $T$  - ростова температура поверхні і  $k_B$  - стала Больцмана.

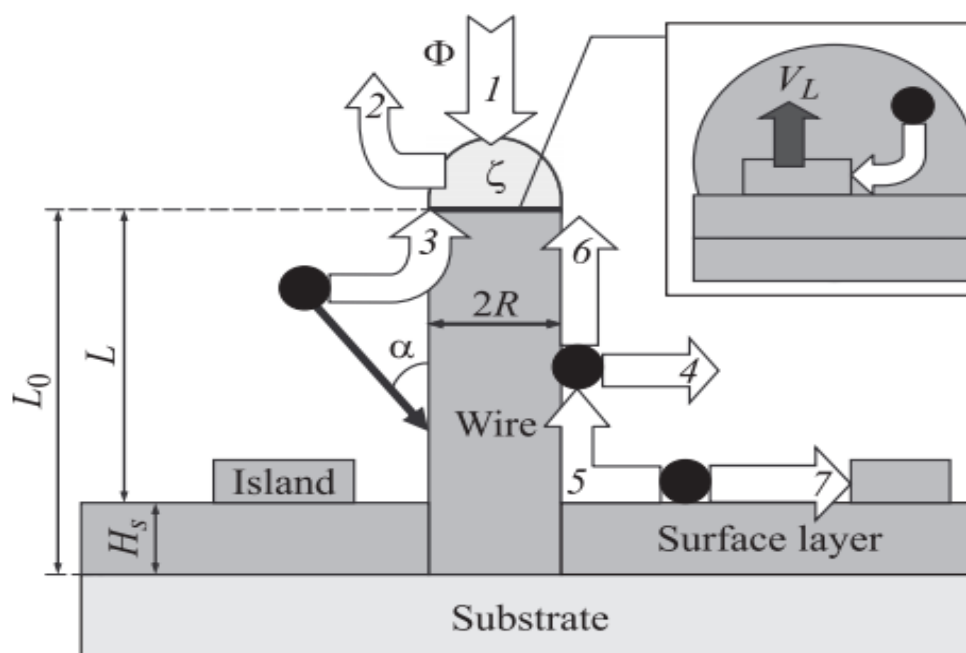
Рушійною силою нуклеації на вершині ННК є ефективне пересичення розчину [5]:

$$\xi = \exp\left(\frac{\Delta\mu_{LV}}{k_B T}\right) - 1 \quad (2.8)$$

де  $\Delta\mu_{LV} = \mu_L - \mu_W$  - різниця хімічних потенціалів рідини( $\mu_L$ ) і ННК( $\mu_W$ ) з врахуванням кривизни поверхні краплі [5].



На рисунку 2.5 схематично продемонстровані кінетичні процеси росту ННК [5].



**Рис. 2.5** Процеси, що відбуваються при рості ННК: 1 - пряме потрапляння в краплю, 2 - десорбція із краплі, 3 - дифузія частинок із бокових граней, 4 - десорбція з бокових граней, 5,6 - дифузія з поверхні на бокові грані і через бокові грані на вершину, 7 - ріст підкладки ( $H_s$  - середня висота шару). На вставці показана нуклеація з пересиченого розчину краплі, що призводить до росту ННК із швидкістю  $V_L = dV_0/dt$ ;  $L_0$  - довжина ННК, починаючи від підкладки,  $t$  - час. [5]

## 2) Радіус нановіскера GaAs

Очевидно, що краплі на підкладці і на вершині ННК знаходяться у різних умовах. Сили поверхневого натягу напрямлені по різному тому краплі мають різні крайові кути, які ми позначимо як  $\alpha_b$  (на підкладці) та  $\alpha_t$  (на вершині ННК) (рис. 2.6). Також доцільно припустити, що об'єм краплі  $V$  залишається незмінним протягом усього процесу росту ННК. Із цього припущення, а також формули (2.6) слідує те, що повинен змінитися й радіус краплі. Позначимо радіус на вершині ННК  $r_t$ , а на підкладці  $r_b$  (рис. 2.6).

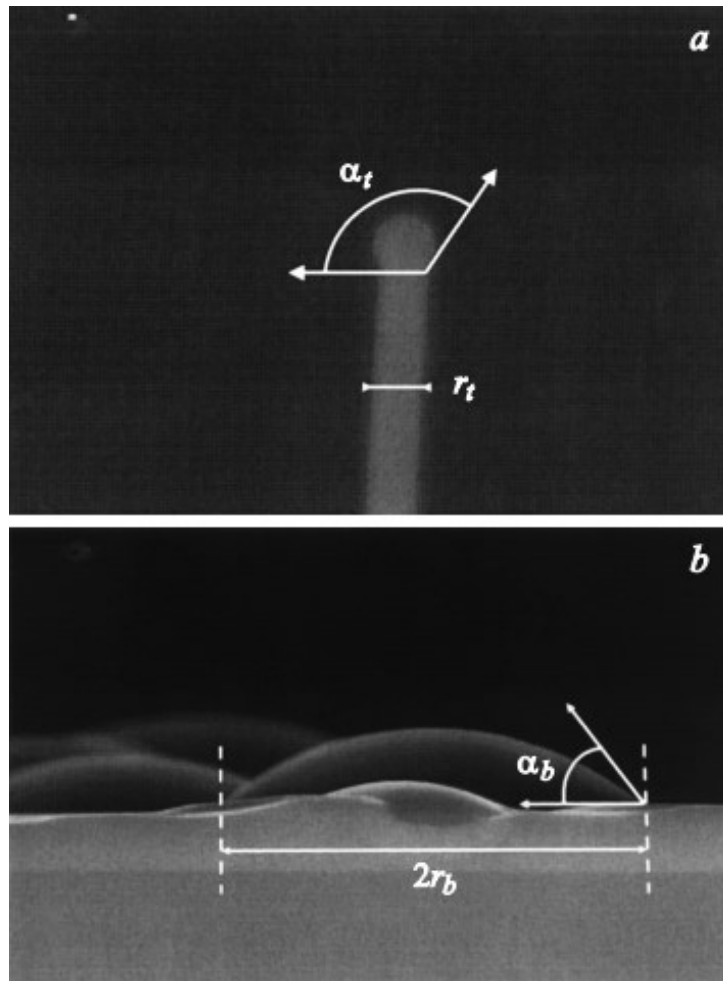
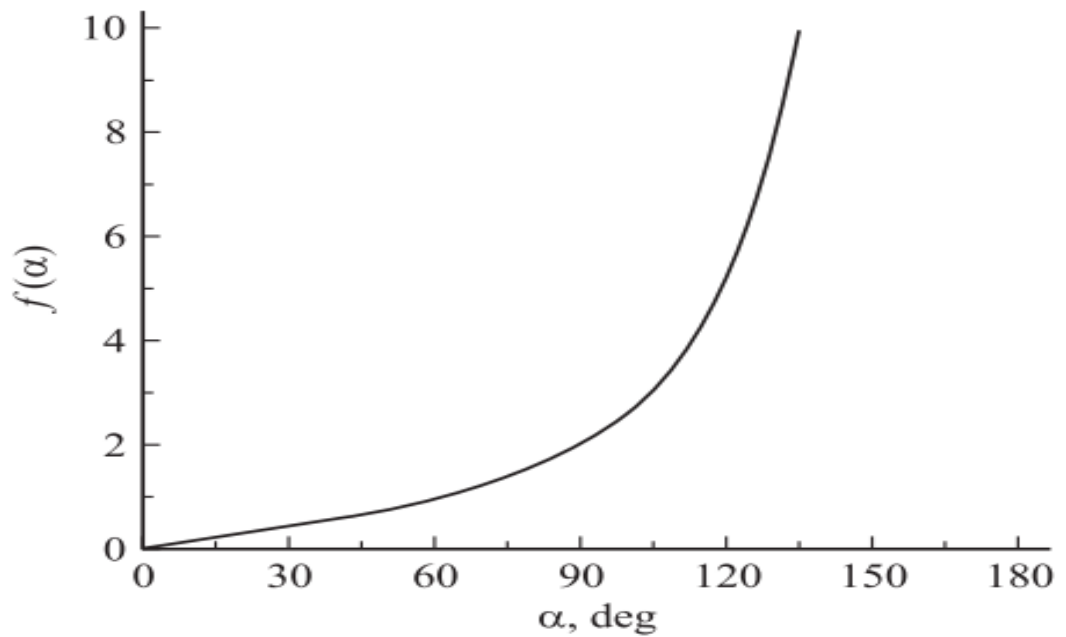


Рис. 2.6 а - крапля каталізатора на вершині GaAs-ННК,  $r_t$  - радіус краплі на вершині,  $\alpha_t$  - краєвий кут краплі на вершині ННК; б - крапля каталізатора Au на поверхні підкладки GaAs,  $r_b$  - радіус краплі на поверхні підкладки,  $\alpha_b$  - краєвий кут краплі на поверхні підкладки[6]

Використовуючи (2.5) та (2.6), був отриманий вираз для  $r_t$  [6]:

$$r_t = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi f(\alpha_t)}} = r_b \left( \frac{f(\alpha_b)}{f(\alpha_t)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

При фізичних значеннях крайового кута  $\alpha$  (від 0 до  $\pi$ ) функція  $f(\alpha)$  монотонно зростає (рис. 2.7.).



**Рис. 2.7. Залежність функції  $f(\alpha)$  від значення крайового кута  $\alpha$  краплі золота до поверхні [111] GaAs [6]**

Тому із  $\alpha_b < \alpha_t$  випливає, що  $r_b > r_t$ . Тобто при утворенні ННК радіус основи краплі зменшується. Відповідно радіус ННК буде меншим радіусу краплі на підкладці [6].

### **2.2.3. Ріст одинарної квантової точки InAs**

При гетероепітаксійному зростанні зазвичай було прийнято розрізняти три режими:

- Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merwe) - реалізується пошарове (двовимірний зростання) матеріалу В на підкладці А;
- Фолмер-Вебера (Volmer-Weber) - має місце острівцеве (тривимірне) зростання В на відкритій поверхні підкладки А;
- Странского-Крастанова (Stranski-Krastanow) - спочатку реалізується пошарове зростання В і А з подальшим утворенням тривимірних острівців В на вкритій підкладці [7].

У гетероепітаксійних системах при наявності неузгодженості за сталою решітки між осаджуваним матеріалом і підкладкою первинне зростання може

відбуватися пошарово. Однак більш товстий шар має більшу пружну енергію, і виникає тенденція зменшити пружну енергію шляхом утворення ізольованих острівців. У цих острівцях відбувається релаксація пружних напружень і відповідне зменшення пружної енергії. Так виникає режим зростання Странского-Крастанова [7].

Експерименти на InAs / GaAs (001) [8] і на Ge / Si (001) [8,9] дійсно продемонстрували можливість утворення тривимірних когерентно напружених, тобто бездислокаційних острівців. У теоретичних роботах [10,11] було показано, що формування тривимірних когерентно напружених острівців призводить до зменшення пружної енергії і при не дуже великому обсязі острівця (до  $\approx 106$  атомів) більш вигідно, ніж виникнення острівця з дислокаціями. Однак традиційно вважалося, що в системі тривимірних острівців неминуче повинна відбуватися коалесценція, коли великі острівці ростуть за рахунок дифузійного перерозподілу матеріалу, що приводить до зменшення і зникнення маленьких острівців [12], і в кінцевому підсумку утворюються острівці такого обсягу, в яких енергетично вигідно формування дислокацій невідповідності. Таке співіснування когерентних острівців і острівців з дислокаціями спостерігалось в роботах [13,7].

Дослідження морфології гетерофазної системи InAs / GaAs(001) дало наступні результати. Після осадження критичної середньої товщини InAs(001) (1.6–1.7 моношарів) відбувається утворення тривимірних острівців InAs. Осадження 2 моношарів InAs призводить до утворення острівців малого розміру, в основному не проявляючих чіткої кристаллографічної огранки і володіючих широким розподілом за розміром. Збільшення товщини осаджуваного InAs до 4 моношарів призводить до утворення густого масиву острівців, маючих квадратну основу із сторонами, орієнтованими по осям [100] і [010], і маючих довжину 14 нм. Дослідження методами електронної спектроскопії високого розширення при спостереженні в площині поверхні і в поперечному перерізі показало, що острівці InAs мають форму піраміди з нахиленими гранями (101) і гострими ребрами між гранями. Статистичне

дослідження взаємного розташування острівців показало основний напрямок між найближчими сусідами вздовж осей [100] і [010] [7].

У класичному випадку росту КТ InAs осідає безпосередньо на підкладку. За рахунок невідповідності решіток після досягнення певної товщини змочувального шару відбувається ріст тривимірних острівців – КТ.

У нашому випадку структури InAs потрапляє у краплю золота, що є як хімічним (що важливо при CVD - методі) та фізичним каталізатором. Ріст відбуватиметься не на всій підкладці, а лише на вершині ННК. У такому разі параметри росту зміняться через вплив краплі, обмежену площу для росту, а також відсутність взаємодії із іншими КТ.

### **2.3. Розрахунок параметрів технологічного маршруту росту гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs для CVD – методу**

Розрахунок та оцінка технологічних параметрів росту проводиться наступним чином:

#### **1) Розрахунок параметрів золотої плівки.**

За основу розрахунків було взято формули (2.5) та (2.6). Припускається, що плівка золота матиме форму круга із певною товщиною  $h$ . Об'єм краплі  $V$  буде такий же ж як і об'єм плівки, тому отримаємо:

$$V = \pi r_{Au}^2 h \quad (2.10)$$

де  $V$  - об'єм краплі Au;  $r_{Au}$  - радіус плівки Au;  $h$  - висота плівки Au

Отже вираз (2.5) набуває наступного вигляду:

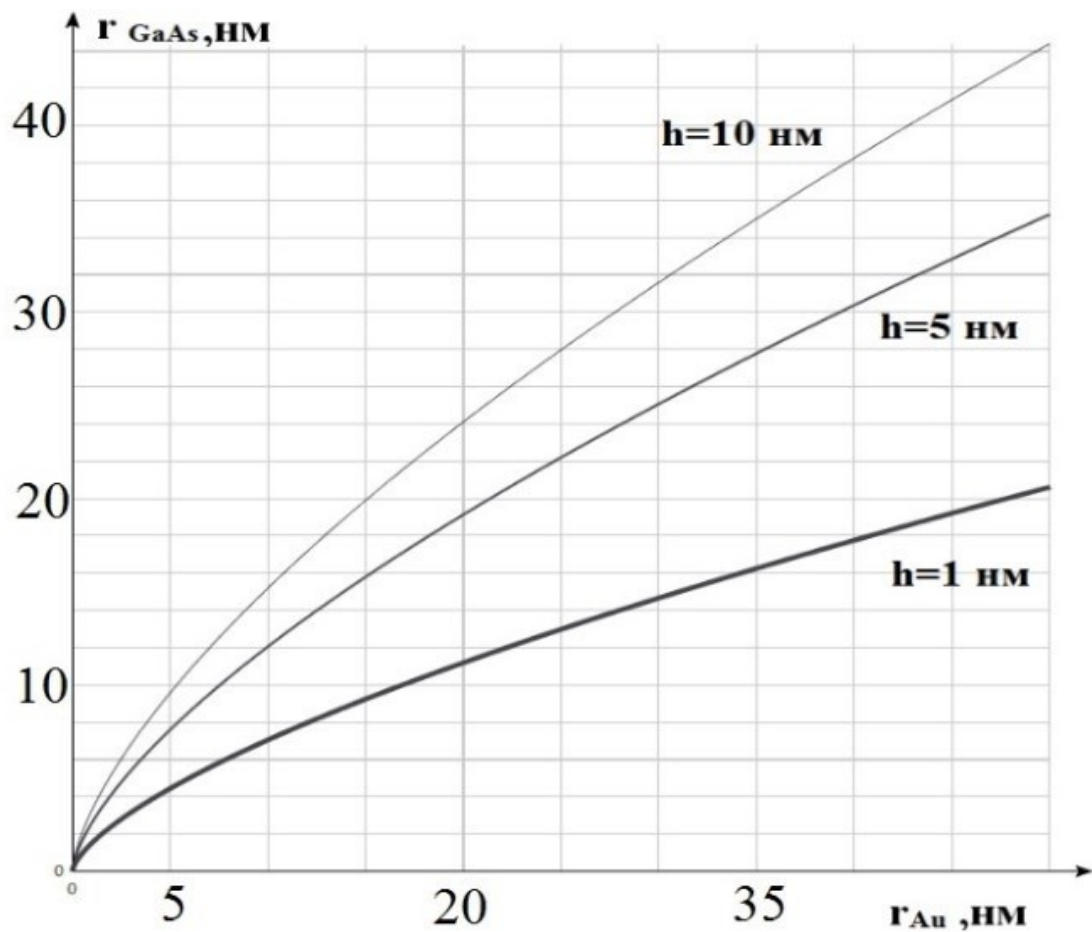
$$r = \sqrt[3]{\frac{3\pi r_{Au}^2 h}{\pi f(\alpha)}} \quad (2.11)$$

Вираз (2.11) є залежністю радіусу краплі від радіусу та висоти плівки  $r(r_{Au}, h)$ . Для розрахунку даної залежності необхідно визначити крайовий кут  $\alpha$ .

Дана величина була отримана із рисунку 2.7 і становить  $55^\circ$ . Отже  $f(\alpha) = 0.86$ .  
Формула (2.11) можна записати:

$$r(r_{Au}, h) = \sqrt[3]{\frac{3r_{Au}^2}{0.86}} = \sqrt[3]{3.5r_{Au}^2} \quad (2.12)$$

Основну технологічну цінність несе залежність  $r(r_{Au})$  при  $h = \text{const}$ . Вона розрахована і зображена на рис. 2.8



**Рис. 2.8 Залежності радіусу  $r_{GaAs}$  – КТ InAs – GaAs гетеронановіскера GaAs – КТ InAs - GaAs від зміни радіусу плівки золота  $r_{Au}$  при товщинах плівки золота  $h=1, 5, 10$  нм.**

Аналізуючи залежність можна помітити, що вона є нелінійною. Чим більша товщина тим менший приріст радіусу.

## 2) Розрахунок часу росту ННК GaAs

Із роботи [14] відомо, що швидкість вертикального росту ННК залежить від швидкості нуклеації  $I = I(\zeta)$ , швидкості латеріального двовимірного росту  $v = v(\zeta)$  та радіусу ННК  $r$ . Тобто  $V_L = V_L(I, R, v)$ , де  $V_L$  - швидкість росту ННК. Точні вирази були зроблені для крайових умов, малі та великі грані. Щоб сформувати перехід між двома крайовими випадками був введений безрозмірний параметр  $\alpha_K$ , який визначається:

$$\alpha_K = \frac{\pi r^3 I}{v} \quad (2.13)$$

де  $\frac{r}{v}$  - час, що необхідний зародку для зарощування всієї грані.

- час між двома послідовними зародкоутвореннями на грані.

Використовуючи цей коефіцієнт була сформована єдина формула для швидкості росу ННК:

$$V_L = h \pi r^2 I F(\alpha_K) \quad (2.14)$$

де  $h$  - довжина ННК;  $F(\alpha_K)$  - функція, що описує перехід від моноцентричного до поліцентричного режиму нуклеації [14].

Найпростіше функція  $F(\alpha_K)$  була сформована у моделі Кацієва [15]:

$$F(\alpha_K) = \frac{1}{1 + \alpha_K^2} \quad (2.15)$$

У роботі [16] нановіскери арсеніду галію були вирощені з допомогою методу молекулярний промінь – рідина – кристал, що є модифікацією ПРК – механізму. У цій роботі ріст проводився за температури  $550^\circ\text{C}$  і швидкість росту складала 1 МШ/с. Тому на основі цих даних можна приблизно оцінити швидкість росту для  $670^\circ\text{C}$  як 1.2 МШ/с. У роботі [14] при температурі  $550^\circ\text{C}$ ,  $v=34$  нм/с. Тому для  $670^\circ\text{C}$  дані параметри можна прийняти як  $v=41$  нм/с відповідно. Для зручності швидкість росту буде розраховуватись в одиницях –

МШ/с. Для зручності представимо  $r$ (нм), як  $r_n \times 10^{-9}$ (м). На основі цих даних формула (2.14) буде представлена у наступному вигляді:

$$V_L = \frac{160.14 \times 10^{-6} \times r_n^2}{1 + 2.48 \times 10^{-4} \times r_n^2} \quad (2.16)$$

На рис.2.9 представлена залежність швидкості росту ННК GaAs (МШ/С) від радіусу ННК GaAs (нм).

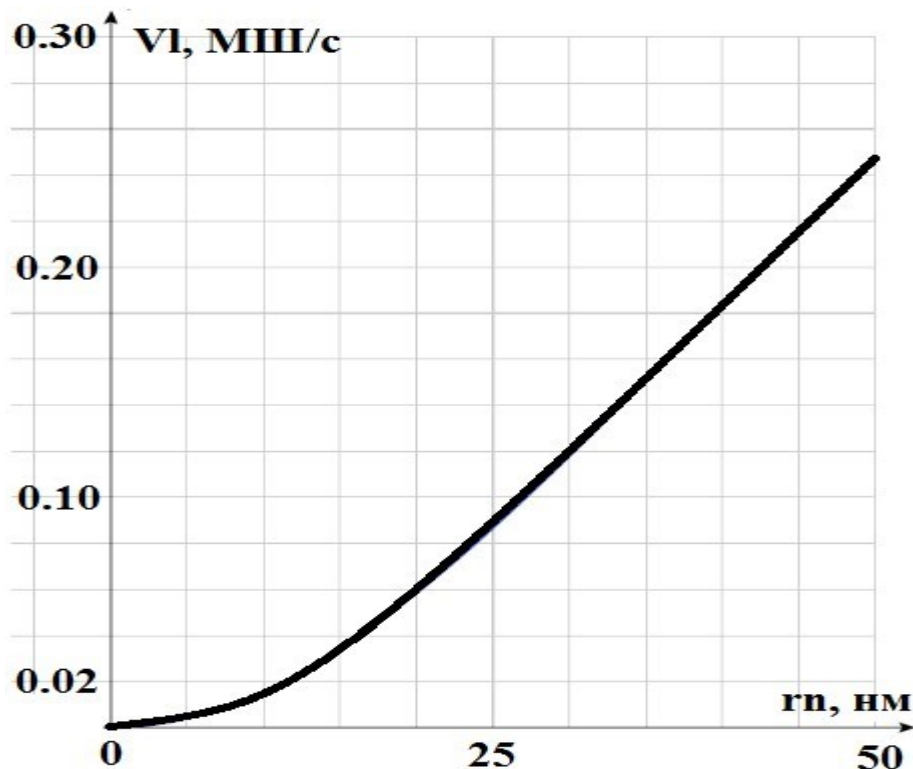


Рис.2.9 Залежність швидкості росту  $V_L$  ННК GaAs від радіусу GaAs  $r_n$ .

### 3) Кінетика росту КТ InAs

Для аналізу кінетики росту КТ InAs за основу була взята робота [17]. У цій роботі було розраховано ряд параметрів для росту КТ InAs при класичному виконанні, тобто при вирощуванні масиву КТ InAs.

КТ InAs росте не одразу, а спочатку формується певний змочувальний шар (ЗШ) In, опісля цього починає формуватися сама КТ InAs. Рівноважна товщина ЗШ In розраховується за формулою [17]:

$$\dots, \quad (2.17)$$



де  $\Delta E$  – залежний від контактного кута піраміди  $\theta$  острівця КТ InAs коефіцієнт релаксації пружної енергії в острівці КТ InAs,  $\lambda$  – модуль пружності,  $\varepsilon_0$  – невідповідність решіток КТ InAs з підкладкою GaAs,  $\Psi_0$  – густина змочувальної енергії InAs на поверхні підкладки GaAs, і  $h_0$  – висота ЗШ InAs. При  $h > h_{eq}$  відбувається перехід від двомірного до тримірного росту, оскільки зменшення пружної енергії системи переважає над енергією, що додатково витрачається на створення КТ InAs [17].

Острівки КТ InAs утворюються за рахунок флуктуаційного подолання зародками нової фази активаційного бар'єру нуклеації. Активаційний бар'єр нуклеації  $F$  [10] в одиницях kT може бути представлений у вигляді:

$$F = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta E + 4 \pi r^2 \sigma(\theta), \quad (2.18)$$

рівноважна температура  $T_e$  визначає інтенсивність нуклеації острівків при даній температурі поверхні  $T$  та товщині змочувального шару  $h$  [17].

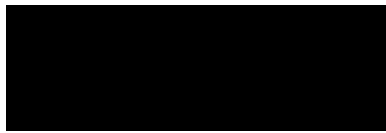
Вираз для  $T_e$  у випадку пірамідальних острівків із квадратною основою як у випадку КТ InAs в матриці GaAs має такий вигляд [17]:

$$T_e = \frac{\sigma(0)}{\sigma(\theta)} \quad (2.19)$$

де  $\sigma(0)$  та  $\sigma(\theta)$  - питомі поверхневі енергії в площині поверхні підкладки та бокових граней піраміди КТ InAs із врахуванням перенормування, викликаного невідповідністю решіток,  $\theta$  - контактний кут піраміди. Для характеристики процесів формування острівків при за критичній ефективній товщині осадження, вводиться кінетичний параметр  $Q$ , який по величині дорівнює відношенню часу вирощування рівноважного ЗШ InAs  $t_{eq}$  та характерного часу  $t$  перенесення атомів із ЗШ InAs в сформовані острівки КТ InAs [17]:

$$Q = t_{eq}/t \quad (2.20)$$

Отриманий в [5] вираз для критичної ефективної товщини  $h_c$ , можна представити у вигляді[17]:



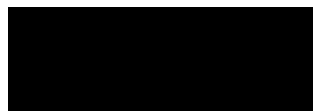
(2.21)

Час вирощування ЗШ InAs рівноважної товщини  $t_{eq} = h_{eq}/V$ , а час вирощування ЗШ InAs критичної товщини  $t_c = h_c/V$ . Час росту ЗШ InAs від рівноважної до критичної товщини становить  $t_c - t_{eq}$ .

Отримані в [20] вирази для тривалості стадій нуклеації та характерного часу релаксації острівків КТ InAs за розмірами демонструють наявність отриманої часової залежності:



(2.22)



(2.23)

Усі ці формули будуть справедливі і для структури, що розглядається у цій роботі. Але все ж особливі умови її росту будуть впливати на всі ростові параметри. Слід розглянути ці особливості:

- КТ InAs росте у краплі золота, що обумовлює певну додаткову поверхневу енергію на межі розділу InAs – Au (класичному випадку поверхнева енергія граней формується лише формою поверхні)
- Наявність краплі створює додатковий тиск, що діє на КТ InAs.
- КТ InAs є одинарною, а це означає, що нема взаємодії із іншими КТ та площа на якій вона розташована є обмежена радіусом ННК.

Візьмемо до уваги формулу (23). У ній є  $\sigma(0)$  та  $\sigma(\theta)$  - питомі поверхневі енергії в площині поверхні підкладки та бокових граней піраміди КТ InAs. Обидві ці величини будуть інші для врахування наявності краплі. У роботі [17]  $\sigma(0)=0,213$  Дж/м<sup>2</sup>, де даний параметр був розрахований для атмосферного тиску. Насправді ж у цій структурі на КТ InAs діє тиск більший, а саме:

$$p = p_{\text{атм}} + p_{\text{InAs}} + p_{\text{Au}} \quad (2.24)$$

де  $p_{\text{атм}}=0.1$  Мпа – атмосферний тиск;  $p_{\text{InAs}}=3.5$  Гпа – тиск у КТ InAs, розрахований у роботі [21];  $p_{\text{Au}}$  – тиск краплі Au.

Тиск краплі визначається рівнянням Юнга-Лапласа:

$$p_{Au} = \sigma \left( \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (2.25)$$

Де  $R_x$  та  $R_y$  – радіуси кривизни;  $\sigma$  = коефіцієнт поверхневого натягу

Отже потрібно розрахувати  $\sigma(\theta)$  за тиску:

(2.26)

Спростимо формулу (2.26), знехтувавши атмосферним тиском в силу його малої величини у порівнянні із тиском КТ InAs, та припустивши, що крапля має форму на півсфери  $R_x=R_y=r$ :

$$p = 3.5 + \sigma \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \right) = 3.5 + \frac{2\sigma}{r} \quad (2.27)$$

Питома поверхнева енергія бокових граней піраміди КТ InAs буде доповнена питомою поверхневою енергією межі розділу Au –КТ InAs:

$$\sigma_1(\theta) = \sigma(\theta) + \sigma_{Au} \quad (2.28)$$

Оціночне значення коефіцієнта поверхневого натягу золота становить 0.6 Н/м.

Із роботи [21] були взяті данні питомої поверхневої енергії КТ InAs для різного внутрішнього тиску КТ InAs, що наведені у табл. 2.1.:

Значення питомої поверхневої енергії КТ InAs для різного внутрішнього тиску КТ InAs

Таблица 2.1.

| Міжфазні шари на межах розділу середовищ | $\sigma$ , Дж/м <sup>2</sup> |
|------------------------------------------|------------------------------|
| InAs и In $p_x=p_y=0,1$ МПа              | 0,765                        |
| InAs и In $p_x=p_y=3,5$ ГПа              | 0,6318                       |

На основі цих даних запишемо формулу, що дає можливість приблизно оцінити значення питомої поверхневої енергії в залежності від тиску:

$$\sigma(0)_p = \frac{0.826p}{3.5 \times 10^9} \times \sigma(0)_{0.1} \quad (2.29)$$

Де  $\sigma(0)_{0.1}$  – значення питомої поверхневої енергії КТ InAs при атмосферному тиску .

Якщо підставити значення тиску, то формула (2.34) виглядатиме наступним чином:

$$\sigma(0)_p = \left( 0.826 + \frac{1.2}{3.5 \times 10^9 \times r} \right) \times \sigma(0)_{0.1} = k_p \times \sigma(0)_{0.1} \quad (2.30)$$

формулу (2.30) можна представити у більш зручнішому вигляді, як що представити  $r$  нанометрах як  $r_n \times 10^{-9}$  у метрах. Тоді ми матимемо просту залежність питомої поверхневої енергії від тиску, що у свою чергу залежить від радіусу:

$$\sigma(0)_p = \left( 0.826 + \frac{0.343}{r_n} \right) \times \sigma(0)_{0.1} \quad (2.31)$$

$$\sigma_{Au} = \frac{0.517 \text{ Дж}}{\text{м}^2}$$

Розраховуємо значення рівноважної температури  $T_e$ , беручи до уваги данні із роботи [17]:  $\sigma(0)_{0.1} = 0.213 \text{ Дж/м}^2$ ,  $\sigma(0)_{0.1} = 0.48 \text{ Дж/м}^2$ ,  $z(\theta) = 0.55$ ,  $\Psi_0 = 0.305 \text{ Дж/м}^2$ ,  $\varphi = 26^\circ$ , а також значення  $T_e$  для класичного випадку 3774 К.

Відмінність температури буде тільки в частині  $\sigma(0)_{0.1}$ , тому можна отримати залежність  $T_e$  знайшовши відношення температур для класичного випадку та випадку гетеронановіскера. Тому буде отримана залежність:

$$T_e = \left( 45.3 - \frac{3.55}{r_n} \right)^3 \quad (2.32)$$

На рис. 2.10 зображено залежність, рівноважної температури  $T_e$  від радіусу віскера  $r_n$  згідно формули (2.32).

У першу чергу варто відмітити те, на скільки більшою є рівноважна температура у випадку гетеронановіскера у порівнянні із класичним випадком.



**Рис. 2.10 Залежність рівноважної температури  $T_e$  від радіусу віскера  $r_n$**

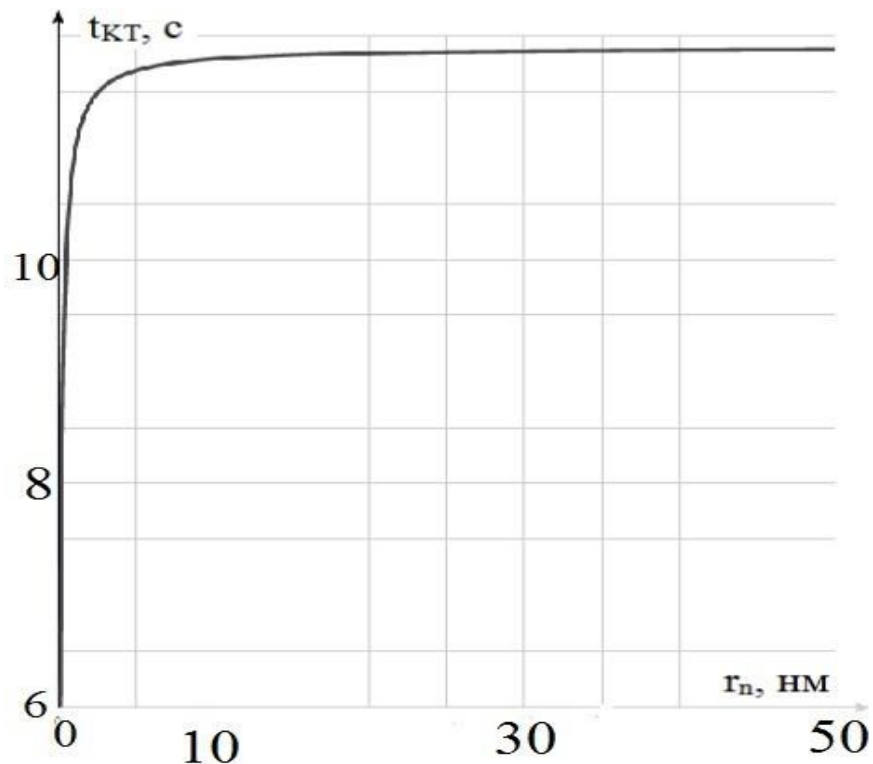
Для цього є дві основні причини: у класичному випадку не враховувався тиск квантової точки, що становить 3.5 ГПа; і внесок наявності поверхні розділу із золотом. Для подальших розрахунків буде прийнято, що радіус структури становить 10 нм, тому у даному випадку  $T_e = 90791.3$  К. Звідси значення активаційного бар'єру нуклеації [redacted] при [redacted].

Із роботи [17]  $Q \approx 4 \times 10^3$  та  $h_{eq} \approx 1,5$  МШ. На основі цих даних по формулі (2.21) розраховується значення для критичної товщини ЗШ InAs  $h_c$ , що становить 4.73 МШ.

$$t_c = h_c/V = 4.73/0.493 = 9.59 \text{ с}, \quad t_{eq} = h_{eq}/V = 3 \text{ с}$$

Отже із формул (2.22) та (2.23): [redacted], [redacted]

Залежність часу формування КТ InAs в структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs  $t_{KT}$  від його радіусу  $r_n$  складається із трьох ділянок: різкого зростання, перехідної ділянки та лінійної ділянки насичення (Рис. 2.12).



**Рис. 2.12. Залежність часу формування КТ InAs  $t_{KT}$  від радіусу гетеронановіскера GaAs - КТ InAs – GaAs  $r_n$**

Можна припустити, що ці ділянки відповідають різним механізмам формування КТ InAs: перша ділянка (0 - 2 нм) - дифузійний механізм росту; друга ділянка (2 - 5 нм) – дифузійно-кінетичний механізм росту; третя ділянка (5 - 50 нм) – кінетичний механізм росту. Оскільки в основі була використана модель для масиву КТ, то адаптація під одинарний випадок КТ InAs мала певну похибку. Вона має якісний характер, а не кількісний.

#### **2.4. Технологічний маршрут росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs в багатоканальному прямоточному реакторі методом хлорид-гідридної епітаксії**

1. Встановлення підкладки в зону росту;
2. Продувка зони росту реактора потоком водню  $V_{H_2} = 3 \text{ см/с}$ , канал-1, час - 9 хв;

3. Установка температурного режиму в зоні росту  $T_p=943$  К, температури зони джерела галію  $T_{\text{джерела Ga}} = 1023\text{K}$ , та температури зони джерела індію  $T_{\text{джерела In}} = 1073$  К, протягом 30 хв;
4. Травлення підкладки : канал 4: протягом 10хв. пропускають потік  $\text{H}_2$  із  $\text{HCl}$ ,  $V_{\text{H}_2} = 1$  см/с. тиск  $P_{\text{HCl}} = 15$  мм.рт.ст;
5. Підвищення температури в зоні росту  $T = 1446$  К для плавлення золота та утворення крапель, протягом 60 хв;
6. Зниження температури в зоні росту до температури  $T = 943$  К, протягом 40 хв;
7. Формування газової фази для росту нановіскера  $\text{GaAs}$  : канал – 2: тиск  $P_{\text{AlCl}_3} = 2$  мм.рт.ст., швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с; канал – 1:  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с, час – 4 сек;
8. Час росту нановіскера висотою 300 нм та радіусом 10нм складає 21950 сек або 366 хвил;
9. Продувка зони росту реактора потоком водню швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с, канал-1, час – 9 хв;
10. Формування газової фази для росту одинарної квантової точки  $\text{InAs}$ : канал – 3 : тиск  $P_{\text{AsCl}_3} = 2$  мм.рт.ст., швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с; канал – 1, швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с, час – 4 сек;
11. Час росту одинарної квантової точки  $\text{InAs}$ , радіусом 10 нм складає 11.1 сек;
12. Продувка зони росту реактора потоком водню швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с, канал-1, час – 9 хв;
13. Формування газової фази для зарощування КТ  $\text{InAs GaAs}$  : канал – 2: тиск  $P_{\text{AlCl}_3} = 2$  мм.рт.ст., швидкість газу-носія  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с; канал – 1:  $V_{\text{H}_2} = 3$  см/с, час – 4 сек;
14. Зарощування КТ  $\text{InAs GaAs}$  товщиною 300 нм становить 380 хвил.
15. Продувка реактору потоком водню  $V_{\text{H}_2} = 7\text{-}10$  см/с, канал-1, зі зниженням температури зони росту до кімнатної температури та зони джерела

із швидкістю – 10 градус/хв до кімнатної температури, час зниження температури = 78 хв.

#### **2.4. Розрахунок загального часу росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs CVD - методом**

Загальний час росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – InAs – GaAs методом хлорид-гідридної епітаксії є сумарною характеристикою операцій технологічного маршруту росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs і складається:

1. Продувка зони росту реактора – 9 хв;
2. Установка температурного режиму в зоні росту – 30 хв;
3. Травлення підкладки – 10 хв;
4. Підвищення температури в зоні росту для плавлення золота – 60 хв;
5. Зниження температури в зоні росту до температури  $T = 943\text{ К}$  – 40 хв;
6. Формування газової фази росту нановіскера GaAs – 4 сек;
7. Ріст нановіскера GaAs – 6 год. 6 хв. 0 сек;
8. Продувка зони росту реактора – 9 хв;
9. Формування газової фази росту одинарної квантової точки InAs – 4 сек;
10. Ріст квантової точки InAs, радіусом 10 нм – 11.1 сек;
11. Продувка зони росту реактора – 9 хв;
12. Формування газової фази для зарощування КТ InAs GaAs – 4 сек;
13. Зарощування КТ InAs GaAs – 6 год. 20 хв. 0 сек;
14. Зниженням температури зони росту до кімнатної температури – 1 год. 18 хв.

Час синтезу гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs CVD - методом складає – 16 год. 31 хв. 23 сек.

#### **Висновок.**

У даній роботі згідно модельних уявлень Гіваргізова – Чернова за ПРК – механізмом, пораховано кінетику росту за певної температури. Це дає можливість розробити технологічний маршрут в багатоканальному



прямоточному реакторі CVD-методом. Проведений аналіз особливостей кінетики формування КТ InAs в матриці GaAs в умовах CVD росту дозволив оцінити основні параметри, які визначають кінетику формування КТ InAs.

Отримані залежності радіусу  $r_{\text{GaAs} - \text{КТ InAs} - \text{GaAs}}$  гетеронановіскера GaAs – КТ InAs - GaAs від зміни радіусу плівки золота  $r_{\text{Au}}$  при товщинах плівки золота  $h=1,5,10$  нм; швидкості росту  $V_L$  ННК GaAs від радіусу ННК GaAs  $r_n$ ; рівноважної температури  $T_e$  від радіусу віскера  $r_n$ ; залежність часу формування КТ InAs  $t_{\text{КТ}}$  від радіусу гетеронановіскера GaAs - КТ InAs – GaAs  $r_n$ . На базі цих даних був розроблений технологічний маршрут росту одинарної квантової точки InAs у структурі гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs для багатоканального прямоточного реактора CVD - метода.

Загальний час синтезу гетеронановіскера GaAs – КТ InAs – GaAs CVD - методом становить – 16 год. 31 хв. 23 сек. Отримані результати непогано узгоджуються із результатами досліджень експериментально отриманих структур із КТ InAs на поверхні GaAs (100), отриманих молекулярно-променевою (МПЕ) та МОС - гідридною епітаксією. Отримані кінетичні параметри формування КТ InAs в гетеронановіскері GaAs – КТ InAs - GaAs дають можливість оптимізувати технологічні режими для CVD – методу та моделювати його структуру.

### Список літератури

1. Квантова точка //uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0\_%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BA%D0%B0
2. Арсенид галлія – індія // ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B4\_%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B8%D1%8F%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%8F
3. Hisashi Seki and Akinori Koukitu, Semiconductor Technologies, **19**, 81 (1986)
4. R.S. Wagner, W.C. Ellis // Appl. Phys. Lett., **4**, 89 (1964).

5. В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов // ФТП, 2009, **том 43**, вып. 12, - с. 1585 – 1628
6. Н.В. Сибирёв, М.В. Назаренко, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, В.Г. Дубровский // ФТП, 2010, **том 44**, вып. 1. - с. 114 - 117
7. N.N. Ledentsov, V.A. Schukin, T. Kettler, K. Posilovic, D. Bimberg, L.Y. Karachinsky, A.Y. Gladyshev, M.V. Maximov, L.I. Novikov, Y.M. Shernakov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, J.Cryst. Growth, **301**, 914 (2007).
8. D.E. Eaglesham, M. Cerullo // Phys. Rev. Lett., 64, 1943 (1990).
9. J.-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally // Phys. Rev. Lett., 65, 1020 (1990).
10. D. Vanderbilt, L.K. Wickham // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 202, 555 (1991).
11. C. Ratsch, A. Zangwill // Surf. Sci., 293, 123 (1993).
12. И.М. Лифшиц, В.В. Слезов // ЖЭТФ, 35, 479 (1958).
13. Glas, C. Guille, P. Henoc, F. Houzay // Inst. Phys. Conf. Ser., **87**, 71 (1987).
14. В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов // ФТП, 2009, **том 43**, вып. 12. - с. 1585 – 1628
15. D. Kashchiev. Cryst. Growth and Design, 6, 1154 (2006).
16. А. А. Тонких , Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, И.П. Сошников, В.М. Устинов // ФТП, 2004, **том 38**, вып. 10.- с. 1256 - 1260
17. С.К. Губа Формування квантових точок InAs в матриці GaAs у кінетичному режимі для CVD-методу // Журнал нано – та електронної фізики, Т.9, №3, 03026(4с) 2017
18. M. Grundmann, N.N. Ledentsov, O. Stier, D. Bimberg, V.M. Ustinov, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov // Appl. Phys. Lett (1996).- p. 979.
19. N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirsraedter, J. Christen, R. Heitz, J. Bohrer, F. Heinrichsdorf, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov // Proc. 22nd Int. Conf. Phys. Semicond, Vancouver(Canada, August 1994).- v. **3**.- p. 1855.

- 20.V.G. Dubrovskii, V.A. Egorov, G.E.Cirlin, N.K. Polyakov, Yu.B. Samsonenko, N.V. Kryzhanovskay, A.F. Tsatsulnikov, and V.M. Ustinov, Semiconductors, 37, 855 (2003)
21. S.K. Guba and V.N. Yuzevich, Semiconductors, **48**, 905 (2014)