

O`ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O`RTA MAXSUS  
TA'LIM VAZIRLIGI



URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI  
FIZIKA-MATEMATIKA FAKULTETI

401-fizika guruhi talabasi

Otamurotova Dilnozaning 5440100- Fizika ta'lim yo`nalishi bo'yicha  
bakalavr darajasini olish uchun

# ***BITIRUV MALAKAVIY ISHI***

**Mavzu: Ipsimon nanokristallarning strukturalarini olish va uning  
xossalarini o'rganish.**

Ilmiy rahbar:

dots. Ismoilov Shavkat.

Urganch 2013 yil

*1-ilova. Bitiruv malakaviy ishining titul varazi*

**O`ZBEKISTON RESPUBLIKASI**  
**OLIY VA O`RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**  
**URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI**  
**FIZIKA-MATEMATIKA FAKULTETI**  
**FIZIKA**

**Ipsimon nanokristallarni strukturalarini olish va uning xossalarini  
o'rganish.**

Bajaruvchi:

Otamurotova Dilnoza

Rahbar:

dots. Ismoilov Shavkat

Urganch shahri – 2013 yil

# URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI

## Fizika-matematika fakulteti

Fizika kafedrası

### BITIRUV MALAKAVIY ISHNI BAJARISH BO`YICHA

#### TOPSHIRIQLAR REJASI:

1. Talaba **Otamurotova Dilnozaga** Universitet rektorining 04.01.2013 yildagi 2-T-sonli buyrug`i bilan bitiruv malakaviy ish bajarish uchun “Ipsimon nanokristallarning strukturalarini olish va uning xossalarini o`rganish” mavzusi tasdiqlangan.

2. Kafedra majlisining qaroriga binoan dots. Ismailov Sh.K. bitiruv malakaviy ishini bajarishga rahbar qilib tayinlangan.

3. Bitiruv malakaviy ishining tarkibiy tuzilmasi: kirish qismi, uch bob, birinchi bob uch rejadan, ikkinchi bob ikki rejadan, uchinchi bob ikki rejadan iborat.

4. Bitiruv malakaviy ish uchun ma`lumotlar: ilmiy jurnallar, kitoblar va internet ma`lumotlaridan olinadi.

5. Bitiruv malakaviy ishga \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ ilova qilinadi.

### Bitiruv malakaviy ishni bajarish jadvali

| №  | Loyiha bosqichlarining nomi                                                                                                        | Nazorat vaqti  |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1  | Mavzuni kafedrada tasdiqlash                                                                                                       | 16.11.2012     |
| 2  | Malakaviy bitiruv ishi topshirig`i mavzuni va hajmini aniqlash.                                                                    | 10.12.2012     |
| 3  | Internetdan fizikaga oid saytlardan eng kichik tasir to`g`risida materiallar to`plash                                              | 17.02.13 gacha |
| 4  | Mavzu bo`yicha malakaviy bitiruv ishi mazmuni, hajmi va tartibini aniqlashtirish                                                   | 09.03.2013     |
| 5  | Malakaviy bitiruv ishi loyihasining dastlabki eskizlarini tasdiqlash                                                               | 23.03.2012     |
| 6  | Barcha eskizlarni to`la tasdiqlash va malakaviy bitiruv ishi loyihasi nazariy va amaliy qismlari tasdiqlash                        | 06.04.2012     |
| 7  | Ipsimon nanokristallarning strukturasini olish va uning xossalarini o`rganishga doir ma`lumotlarni taxlil qilish                   | 20.04.2012     |
| 8  | Malakaviy bitiruv ishi loyihasini bajarishning borishi nazorati va uning nazariy qismining kafedradagi muhokamasi                  | 04.05.2012     |
| 9  | Kafedra mudiri va rahbar tomonidan tugallangan loyihani ko`rikdan o`tkazish                                                        | 02.06.2012     |
| 10 | Tugallangan ishni malakaviy bitiruv ishi loyihasi rahbar xulosasi va uni himoyaga tavsiya bilan birgalikda kafedraga taqdim qilish | 09.06.2012     |

Bitiruv malakaviy ish rahbari: \_\_\_\_\_ Ismoilov Sh.K.

Bajaruvchi talaba: \_\_\_\_\_ Otamurotova Dilnozaning

2012 yil 10 noyabr

Topshiriqlar rejasi va jadvali kafedra majlisida 2012 yil tasdiqlandi

(6-sonli bayonnoma)

Kafedra mudiri: \_\_\_\_\_ dots. Aminov U.A.

(imzo)

**Urganch davlat universiteti**  
**Fizika-matematika fakulteti**  
**Fizika kafedrası**

Bitiruv malakaviy ish **2013-01-14**-sonli tartib raqam bilan qayd qilindi.

Bitiruv malakaviy ishni bajaruvchining ismi-sharifi:      Otamurotova  
Dilnoza

Bitiruv malakaviy ishning mavzusi: Ipsimon nanokristallarning  
strukturalarini olish va uning xossalarini o'rganish.

Ilmiy rahbar (maslahatchi) ning ismi-sharifi:      Ismoilov Sh.K.

Bitiruv malakaviy ish kafedraning 2013 yil 18 iyunda o'tkazilgan majlisi  
qaroriga muvofiq DAK majlisida himoya qildi.

Bitiruv malakaviy ishga taqrizchi qilib Abdukarimov X. tayinlandi.

Kafedra mudiri: \_\_\_\_\_ dots. Aminov U.A.

Kafedra majlisining qaroriga binoan bitiruv malakaviy ishni DAK majlisida  
himoya qilish bo'yicha tavsiyasiga roziman.

Fakultet dekani: \_\_\_\_\_ dots. Abdullayev B.I.

**Urganch davlat universiteti**  
**Fizika-matematika fakulteti**  
**Fizika kafedrası**

**5440100-Fizika bakalavr ta'lim yo'nalishi**

Tasdiqlayman  
fakultet dekani  
dots. Abdullayev B.I.  
“\_\_\_”\_\_\_\_\_2013 y.

**BITIRUV MALAKAVIY ISH BO'YICHA TOPSHIRIQ**

Talaba: Otamurotova Dilnoza

1. Ishning mavzusi: Ipsimon nanokristallarning strukturalarini olish va uning xossalarini o'rganish.

04.01.2013 yil universitet rektorining 2-T-sonli buyrug'i bilan tasdiqlangan.

2. Ishni topshirish muddati: “\_\_\_”\_\_\_\_\_2013 y.

3. Mavzu bo'yicha dastlabki ma'lumotlar beruvchi adabiyotlar ro'yxati

- 1) В.Г. Дубровский, Г.Э.Цырлин, В.М.Устиной. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: ФТП, 2009, том 43, вып. 12
- 2) [1] H. Sakaki. Jpn. Appl. Phys., 19, L735 (1980).
- 3) [2] R.S.Wagner, W.C.Ellis. Appl. Phys. Lett., 4, 89 (1964).
- 4) [3] Е.И. Гиваргизов. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара (М., Наука, 1977).
- 5) [4] P.M. Petroff, A.C. Gossard, W. Wiegmann. Appl. Phys. Lett., 45, 620 (1984).

5. Chizma materiallar  
ro'yxati: \_\_\_\_\_

6.  
Maslahatchilar: \_\_\_\_\_

| Bo`limlar | Maslahatchi<br>F.I.SH. | Imzo, sana         |                          |
|-----------|------------------------|--------------------|--------------------------|
|           |                        | Topshiriq<br>berdi | Topshiriq<br>qabul qildi |
| 1.1.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 1.2.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 1.3.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 1.4.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 2.1.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 2.2.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 2.3.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |
| 2.4.      | dots. Ismailov Sh      |                    |                          |

Ishga taqriz yozuvchining F.I.SH., ilmiy darajasi, unvoni: Abdukarimov X.,  
TATU Urganch filiali o'qituvchisi

7. Ilmiy rahbar: dotsent Ismoilov.Sh.H. \_\_\_\_\_

BMI bajaruvchi talaba: Otamurotova Dilnoza \_\_\_\_\_  
(F.I.SH.) (imzo)

Kafedra mudiri: Aminov U.A. \_\_\_\_\_  
(F.I.SH.) (imzo)

# **Mundarija**

## **Kirish.**

### **I.Bob. Ipsimon nanostrukturalarni olinishi.**

- 1.1.Ipsimon nanokristallar o'sishining "Bug'- suyuqlik-kristall" mexanizmi
- 1.2. Ipsimon kristallar o'sishining boshqa mexanizmlari.
- 1.3. Kichik o'lchamli efffektlar va sirt diffuziyasi jarayonlarining o'sishga ta'siri.

### **II Bob. Ipsimon III-V nanokristallarning kristall tuzilishi.**

- 2.1. Ipsimon nanokristallarning o'sish shartlari.
- 2.2. III-V ipsimon nanokristallarning morfologiyasi va strukturasi.

### **III Bob. Ipsimon nanokristallarning qo'llanilishi.**

- 3.1.Ipsimon nanokristallar asosidagi maydon emmitterlari.
- 3.2. Ipsimon nanokristallar asosidagi foto o'zgartirgichlar va sensorlar.

## **Xulosa.**

## **Adabiyotlar**



## **Kirish**

Keyingi yillardagi yangi nanostrukturalar o'stirish texnologiyasining rivoji axborot olami insonlar kundalik hayotini keskin o'zgartirishiga olib kelmoqda. Bunday nano o'zgarish ob'ektlarni o'stirish, o'rganish sohasi nanotexnologiyalar deyiladi. Hozirda bu atama nafaqat fiziikada, balki biologiya, kimyo, tibbiyot va boshqa sohalarda aham keng ishlatiladigan bo'lib qoldi. Bunday strukturalar optoelektronika va boshqa sohalarda keng qo'lanilgan. Keyinchalik bir o'lchamli (kvant o'ralar), ikki o'lchamli (kvantlar iplar) va uch o'lchamli (kvant nuqtalar) nanostrukturalar yaratildi. Bularda energetik holatlarning kvant spektrlarini turlicha imkoniyatlari yaratildi. Nanostrukturalarning o'ziga xos Transport, elektr, optic, adsorbsion va boshqa xarakteristikalar asosan ularning o'lchami va morfologiyasiga bog'liq.

Quyidagi obektlarning fizikaviy xarakteristikaslari bilan o'lchami arosidagi aloqadorlik nanostrukturalar o'stirishda ularning o'lchaami, zichligi va shakllarini nazorat astyida boshqarib o'stirish masalasini dolzarb qilib qo'ygan.

Men ushbu bitiruv malakaviy ishimda taglik ostiga tik o'stirilgan yarim o'tkazgich bir o'lchamli strukturalarni olish, ularning amaliy ahamiyati va xossalarini adabiyotlar asosida taxliliy o'rgandim. Bunday nanostrukturalar ipsimon nanokristallar (INK) yoki nanoviskerlar (NV) deyiladi. Ipsimon nanokristallar saosan dastlab maxsus sirtlarda o'stiriladi. Ko'pchilik hollarda sirtlar maxsus katalizatorlar yordamida faollashtiriladi. Hozirda ularni o'stirish jarayonlari va xossalarijuda katta qiziqish uyg'otmoqda. Bu birinchi navbatda ipsimon nanokristallarninmg mikro elektronik, optoelektronika, nanotexnikas, nanobiotexnologiya kabi ko'plab sohalarda qo'llanish istiqbollari bilan bog'liq. Ipsimon nanokristallar asosida maydon va geterapolyartranzistorlar, nurlantiruvchi asboblari, turli sensorlar, atom-nur mikroskoplarning zondlari avtoemission katodlar, tunnel diodlar, optoelektrod tranzistorlar va boshqa asboblari yasalmogda. Yon sirtlaridagi elastik kuchlanishlarning effektiv relaksatsiyasi ipsimon nanokristallarning disloqatsiyasiz namunalarini olish imkoniyatini bermogda. Ipsimon nanokristallarning katta ansablari (birlashmalari) ham o'ziga

xos xususiyatlari bilan ajralib turadi. Juda kichik hajmli tizimlardagi nukliatsiya fizikasi ham qiziqarli bo'lib, bunda sirtiy effektlar ham saosiy ro'l o'ynaydi. Bularni hisobga olgan holda o'stirish jarayoni boshqarib ipsimon nanokristallarning turli xususiyatlinamunalarini olish imkoniyatlari mavjud.

2000-yillarda nanoviskerlar bo'yicha olib borilgan ilmiy izlanishlar boshqa nano obe'ktlarni o'rganishga qaraganda ancha yuqoriligicha qolmoqda. Bir o'lchamli kristallarning disloqatsion o'stirishga oid ishlar 1950- yillarda boshlangan. Masalan P. Vagner, B. Ellisning  $\text{SiCl}_4$  va  $\text{H}_2$  bug'laridan Si viskerlarni o'stirish haqida izlanishlari natijalari 1964-yilda e'lon qilingan.

Bu sohada rus olimlaridan E.U. Givargizov izlanishlarini keltirish mumkin. 1970-yillarga kelib ipsimon nanokristallarning “ Bug'- suyuqlik-kristall” mexanizmi asosidagi o'stirishni tushuntirish boyicha bir qator ijobiy natijalarga erishildi. Hozirda sirtni aktivlashtirish o'stirish metodikasi va diagnostikasi diametri 10 nm tartibida bo'lgan ipsimon nanokristallni olish ular massivlarini boshqarish imkoni beradi.

Lekin bu soha hali izlanishlar oxiriga yetgan deyishdan ancha yiroq. Oxirgi yillarda bu sohadagi izlanishlar I. Liber ( Garvard Universiteti) L. Samu'elson va P.Yung (Berlin AQSH) ishlarida yanada rivojini topmoqda. Bu ishimda men bu sohada keyingi yillardagi ishlarni o'rgandim. Shuni alohida takidlash kerakki ipsimon nanokristallarning o'sishi boshqa nano obe'ktlardagi kabi o'z-o'zidan shakllanish jarayonlari hisobiga emas, balki sirtni oldindan maxsus tayyorlash hisobiga amalga oshiriladi. Menimcha ipsimon nanokristallarni o'stirishda ularning diametri, shakli, zichligini boshqarish va bu orqali ularning xossalarini o'zgartirish mumkinligi ular asosida yangi istiqbolli materiallar olish imkonini beradi.

## **I Bob. Ipsimon nanostrukturalarni olinishi**

### **1.1. Ipsimon nanokristallar o'sishining "Bug'-suyuqlik-kristall" mexanizmi.**

Bir o'lchamli kvant strukturalarning o'sish konsentratsiyasi 1380-yilda Sakkaki tomonidan berilgan [1]. Keyinchalik taglik tekisligiga kvant iplarning akspremental metodikasi ishlab chiqilgan. Katalizator bilan aktivlashtirilgan sirtlarda ipsimon nanokristallarni o'stirish mumkin ekanligi Vogner va Erlisning klassik ishlarida 1964- yilda ko'rsatilgan edi.

Ushbu ishda Si(111) taglikka Si ni  $\text{SiCl}_4$  va  $\text{H}_2$  bug'laridan gaz fazali o'tkazgich yo'li bilan olishgan. Bunda o'tkazgich  $1000^\circ\text{C}$  haroratda amalgam oshirilgan edi. Katalizator sifatida o'lchami 1mkm bo'lgan Au zarralaridan foydalanildi. Bunda aniqlanishicha ipsimon nanokristallar o'sishi sirtning Au bilan aktivlashgan sohasida o'sib ularning radiusi taxminan taglikning radiusiga teng ekanligi aniqlangan. Sirtning aktivlashmagan qismida kristallar umuman o'smasligi aniqlangan. Natijada taglik sirtiga pependikulyar ravishda bir o'lchamli kristallar shakllangan bo'lib ularning uzunligi o'sish tezligi va vaqtiga bevosita bog'liq bo'lar ekan [2]. Bu ish turtki bo'lib, ko'pchilik nanoviskerlar o'stirishga qiziqib qoldilar [3-6]. O'stirilgan nanoviskerlarni o'rganish shuni ko'rsatdiki, ular yuqori kristall mukammallikka, mustahkamlikka va boshqa o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'lar ekan. 60-70 yillarda ipsimon nanokristallarning ega o'lchami asosan mikrometr diapazonida bo'lgan edi. Keyin rivojlanish natijasida ularning radiusi 10 nmgacha kamaytirilib, uzunligi bir necha 10 mkm ga yetgan.

Bu sohadagi keyingi rivojlanish Liber Samuelson Yang [7-9] izlanishlari bilan bog'liq deyish mumkin emas.

Bu ishlarda ipsimon nanokristallarning mukammal namunalari olinib ularning o'stirish texnologiyasi rivojlantirildi. Bu strukturalar turli nanoasbob va kirishmalarda qo'llanila boshlandi. Bular nanokanalli maydon tranzistorlari[8, 9,

15] yuqori elektron harakatchanligiga ega tranzistorlar [13] yuqori samarador yorug'lik nurlovchi qurilmalar [14,22,24] va hokazo.

Buning yana bir asosiy tomoni shundaki, optoelektron va mikroelektron komponentalarda kremniy platformada birlashtiriladi.

Zamonaviy ipsimon nonokristallar olishda gazafaz epitaksiya yuqori vakuumli kimyoviy epitaksiya molekulyar-nurli epitaksiya magnitron o'tkazish kabi bir qator o'stirish metodlaridan foydalanilmoqda. Lekin bilarning katta ko'pchiligida aktivlashtirilgan sirtlardan foydalanilmoqda. Bunda sirtni aktivlashtirishda metal katalizatoridan foydalaniladi.

Ipsimon nanokristallarni o'stirish uch bosqichdan iborat (1-rasm) [6] birinchi bosqichda taglikning sirtining g'ovakligi va qatlam (masalan Si yoki GaAs) epitaksial o'stiriladi. Ipsimon nanokristallar asosan (111) yo'nalishda o'stirilganligi uchun taglik sifatida ham (111) orientriga ega Si yoki GaAs lar ishlatiladi. Ikkinchi bosqichda o'stirishning katalizatori tomchilari hosil qilinadi oddiy holda bunda sirtga Au ning juda yupqa ( $d_{Au}=1nm$ ) plyonka qatlami changlantirilib o'tkaziladi. Ipsimon nonokristallarning mukammal massivlarini ochish uchun esa murakkabroq elektron litografiya yoki "nanoimprint" litografiya usullari ishlatiladi. Uchinchi bosqichda esa sirt evtiktig erish temperaturasigacha qizdiriladi. Natijada sirtida katalizatorning to'yingan tagliklari paydo bo'ladi. Keyin yarimo'tkazgich materialini o'tkazish jarayoni amalgam oshiriladi.

Katalizatorning materialini aktivlashtirishi shundan iboratki, bunda taglik ostidagi sirtida o'sish jarayoni aktivlashmagan sohadagidan juda yuqori tezlikda sodir bo'ladi.

Kristallarni bunday yo'nalganligi o'sishning nazariyasi dastlab Vagner va Ellislar [2] tomonidan berilgan. Bu nazariyani quyidagicha bayon qilish mumkin. Faraz qilaylik eritma 2-rasmda keltirilganidek oddiy fazaviy diagrammaga ega bo'lsin (AuSi misolida). Qattiq holatda moddalar umuman aralashmaydi, suyuq holatda esa, yarimo'tkazgich bir jinsli taqsimlangan eritma hosil qiladi. Dastlabki vaqtda sirtida eritma bilan muvozanatda bo'lgan tomchilar joylashadi. O'tkazish natijasida yarimo'tkazgich materialining bir qismi tomchiga tushadi. Tomchiga

bunday tushish turli yo'llar bilan amalga oshishi mumkin: 1) gaz fazadan bevosita tushishi; 2) ipsimon nanokristall uchi tomonidan va yon tomonidan adatomlar diffuziyasi; 3) ipsimon nanokristallar uchlariga taglik tomonidan diffuziya. Bularning barchasida material bug' holatidan suyuqlikka o'tadi va taglik ostida kristallana boshlaydi. Statsionar o'sishda adsorbsiya- dasorbsiya jarayonlari dinamik muvozanati natijasida to'yinish holati doimo saqlab turiladi va diffuziya holida ipsimon nanokristallarning o'sishi taminlanadi. Natijada taglik ostida kristallning lateral o'lchamli ustunlari o'sa boshlaydi va ularning diametri tashqi diametriga teng bo'lib, tomchining ko'tarilish tezligi, kristallning o'sish tezligiga teng bo'ladi. Ipsimon nanokristallarning katalizator tomchilari bilan aktivlashgan sohada tez ikki factor bilan tushuntiriladi. Tashqi sirtida kimyoviy reaksiya tezligining yuqoriligi [2, 3,21] va materialning yon tomonlardan ham diffuziya natijasida kirib kelishi [29,49.52]. birinchi holda tomchi kimyoviy katalizator vazifasini boshqaradi. Shunday qilib ipsimon nanokristall o'sishda yarimo'tkazgich material ikkita fazaviy o'sishni boshidan kechiradi., bug;-suyuqlik, suyuqlik-kristall o'tishlari bo'lib bu "Bug'-Suyuqlik-Kristall" qonunini tushuntiradi.

1-rasm. Bug'-suyuqlik-kristall mexanizmidagi ipsimon nanokristallarning uch bosqichda shakllanishi (GaAs misolida) 1-bosqich GaAs sirtiga GaAs buffer qatlam o'tkazish; 2-bosqich Au ning yupqa qatlamini changlantirish ; 3-bosqich sirtni 600<sup>0</sup>C haroratgacha kuydirish, bunda GaAs va katalizator tomchilari paydo bo'ladi.

2 rasm. "Bug'-Suyuqlik-Kristall" mexanizm asosida GFE metodi bilan SiCl<sub>4</sub> va H<sub>2</sub> bug'lari va Au katalizator tomchilaridan foydalanilgan (a,b) C-As-Si ning sodda fizikaviy diagrammasi. Bunda C<sub>e</sub>(T) suyuq eritmada Si ning muvozanatli konsentratsiyasi, C<sub>2</sub>-viskerlar o'sishda Si konsentratsiyasi, C<sub>v</sub>-berilgan sharoitda bug' bilan muvozanatdagi eritma konsentratsiyasi.

Yuqoridagilarni hisobga olgan holda o'stirishda ishlatiladigan katalizatorga qo'yiladigan talablarni quyidagicha shakllantirish mumkin.

1. suyuq holatda katalizator taglik sirtini ho'llamasi, chunki shunda uch o'lchamli o'sish materialini yuzaga keltiruvchi tomchilar paydo bo'ladi;
2. katalizator va yarimo'tkazgich materialini o'sish haroratidan past, zarur erish haroratiga ega bo'lsin.
3. eritma qattiq holatda aralashmasligi kerak, chunki shunda ipsimon nanokristallga katalizator atomlari kirib kelmasligi taminlanadi.

**3-rasmda GaAs sirtida INE usulida o'stirilgan ipsimon nanokristall massivlari tasviri keltirilgan. Rasmda ipsimon nanokristall uchlaridagi tomchilar yaqqol ko'rinib turibdi. 4-rasmda esa ipsimon nanokristallar o'sishi mexanizmi keltirilgan. O'sishning termodinamik haraklantiruvchi kuchi gaz fazaning to'yinganligi hisoblanadi.**

$$F = \exp(\Delta\mu_{vs}/K_b T) - 1 \quad (1)$$

Bunda  $\Delta\mu_{vs} = \mu_v - \mu_s$  taglik va bug'ning kimyoviy materiallari farqi;

T-o'sish harorati,  $K_b$ -Boltsmon doimiysi.

3 rasm. GaAs ipsimon nanokristallarninmg to'plami (a) va alohida yakkalangan ipsimon nanokristall tasvirlari (b) ipsimon nanokristallar o'stirishda sodir bo'ladigan jarayonlar. 1- tomchiga bevosita kirish, 2-tomchidan desorbsiya, 3-zarralarning yon tomondan diffuziyasi 4-yon sirtidan desorbsiya, 5,6- yon yoqlardan diffuziya.

## **1.2. Ipsimon kristallar o'sishining boshqa mexanizmlari.**

“Bug’-Suyuq-Kristall” mexanizmi ipsimon nonokristallar o'sishining eng ko'p tarqalgan mexanizmi bo'lsa ham, yagona mexanizm emas. Ilmiy adabiyotlarda boshqa al'ternativ metodlar ham keltiriladi.

Ularning biri “bug’-kristall-kristall” mexanizmidir. [30, 33]. Ba'zi ipsimon nanokristallar katalizatorli eritmaning erish temperaturasidan past haroratlarda ham o'stiriladi. Masalan Au katalizator yormamida SiAs ipsimon nanokristallarining 380-430<sup>0</sup> haroratida o'stirilishini keltirish mumkin. Bu temperaturalar diapazoni Au-Si eritmasi minimal evtektig nuqtasida (454,3<sup>0</sup>) pastda joylashgan. Shuning uchun ba'zi adabiyotlarida [30,33]. “bug’-kristall-kristall” mexanizmlari ham keltiriladi. Bunga asosan o'sish ipsimon nanokristall

usullaridagi o'sish qattiq qatlam madan amalgam oshadi. Tarkib murrakkabligi tomchi o'lchamining kichikligini hisobga olsak, katalizatorning fazaviy holati qanday ekanligi unchalik aniq emas.

Birinchidan tomchi sirt taranglik energiyasi hisobiga fazaviy diagramma sezilarli o'zgarishi mumkin. Ikkinchidan III-V ipsimon nonokristall o'sishida binary eritma emas balki, uch komponentali (Au-Si-As) eritmani qarash kerak [8] ichida SiAs li ipsimon nonokristallar yuqoridagi finerlarni tekshirish maqsadida qaytgan elektronlar difraksiyasida o'rganildi. Izlanishlar shuni ko'rsatdiki tomchining hech bo'lmaganda bir qismi qattiq holatda bo'lishi kerak. Sirtni  $425 \pm 30^{\circ}\text{C}$  ga oshirganda hajmiy reflekslar yo'qolib ketgan.

Ipsimon nonokristallar ichida Au tomchilarining mavjud bo'lishi texnologik jihatdan hamma vaqt ham zarur emas. Au ning yon sirtlaridan migratsiyasi ipsimon nonokristall hajmida kirishma markazlarini hosil qilib material xossalarini buzadi. Bu hol ayniqsa Si va III guruh elementlarining nitridlarida yaqqol ko'rinadi. (III-nitridlar) [9, 10, 11] shularda ko'rsatilganidek III-nitridli ipsimon nonokristallar katalizatorsiz ham o'stirilishi mumkin. Bunda taxmin qilinishicha kristallanish markazlari vazifasini Si, As yoki Ga zarralari egallar ekan [12, 13]. Ishlarda GaN viskerlari Si(111) sirtiga INE usulida sirt harorati  $800^{\circ}\text{C}$  bo'lganda o'stirilgan. Bunda hech bir holda metallik tomchilari viskerlar markazida ham, taglikda ham kuzatilmagan.

Ipsimon nonokristallarni olishni yana bir usuli, bu selektiv epitaksiya usulidir. Bunda taglik yuzasi katalizator qayta ishlovdan o'tadi. Bu yo'nalish Fukum [14-16] ishlarda o'rganilgan.

**6-a rasm GaAs ipsimon nono kristallari o'stirishning bosqichlari keltirilgan.** Birinchi bosqichda GaAs (111) sirtiga 20 nm qallinlikda  $\text{SiO}_2$  qatlami o'rnatiladi. Keyin standart elektron metografik usulida va sirtni kimyoviy changlash qilish bilan tartib bilan joylashgan teshikchalar (65) hosil qilinadi. Teshikchalar diametri 50 dan 200 nm gacha diapozonda bo'ladi. Qagamda 0.4 dan 3 mkm diapozonda yotadi. ipsimon nonokristalning o'lchami teshiklarning diametriga bog'liq bo'ladi.

Teshikli sirtga GaAs ni o'tkazish mos gidrid epitaksiya usulida amalgam oshiriladi.

### **1.3. Kichik o'lchamli effektlar va sirt diffuziyasi jarayonlarning o'sishga ta'siri.**

Katalizator o'lchamining juda kichikligi tufayli kichik o'lchamlarda yuzaga keluvchi o'sish effektlari o'sish jarayoniga sezilarli, ba'zida hal qiluvchi ta'sir etadi. Bunday effektlardan asosiylarini ko'rib chiqaylik.

Gibbs Tomson effekti.

Bu effect tomchidagi va kristalldagi kimyoviy potensialni oshiradi. Bu oshirish sirt egrilanishi hisobiga bo'ladi. Bu sirtidan qo'shimcha Laplas bosimi bilan bog'liq.

$$P_L = \alpha \gamma_{lv} / R_{\text{drap}}$$

$$P_W = \gamma_{wv} / R$$

Bular mos ravishda sferik va silindrik egrilangan kristall sirtlaridagi ta'sir etadi. Bunda  $\gamma_{lv}$ -suyuqlik va bug' chegarasidagi sirt energiyasi.

$\gamma_{wv}$ -ipsimon nonokristall yon sirti va bug' chegarasidagi sirt energiyasi.

Hisoblashlar ko'rsatishicha bu energiya GaAs li ipsimon nanokristalllarda tomchilar juda katta qiymatga ega bo'lar ekan.

$$P_L \approx 0.14 - 0.25 \text{ GPa}$$

$$P_W \approx 0.15 \text{ GPa}$$

Taxminan ipsimon nanokristallar o'sishning birinchi modeli bo'lgan Givargizov va Chernov tomonidan taqdim etilgan model bo'yicha yon sirt egrilanishining o'sish tezligiga ta'siri hisobga olingan. Bunda bug' sohasidan tomchiga zarralar o'tishi, keyinchalik to'yingan eritma kristall sirtiga kristallana boshlaydi. Bu ko'pgina tajriba natijalarini izohlaydi.

Izlanishlardan quyidagi uchta xulosa kelib chiqadi:

- 1) R radius ortishi bilan o'sish tezligi oshadi:
- 2) Berilgan sharoit uchun o'sish davom etishining R minimal radiusi tomchida ipsimon nonokristallar o'smaydi:
- 3)  $\sqrt{V_L}$  ning  $1/R$  ga bog'lanishi chiziqli bo'lishi kerak



Yana shuni aytish kerakki kichik o'lchamli yoqlardagi nukleatsiyaning nanomarkaziy rejimi ham ipsimon nonokristallning o'sish tezligi, morfologiyasi va strukturasi ta'sir qiladi. Bu effektning ma'nosi shuki, qatlamli o'sishda radiusi  $R$  kichik bo'lgan yoqlarda har bir qatlamda bitta kristallanish markazi shakllanadi. Ko'pgina ishlarda o'sish jarayoniga ushbu hodisani ta'siri o'rganilgan.

Uchlanma chiziqdagi nukleatsiya –bu kristall-suyuqlik- gaz fazaning birgalikdagi mavjud bo'lishi bo'lib, bu III-V tipidagi vyursit strukturali ipsimon nonokristallarni o'rganilgan [8] ishda qaralgan.

Nisbatan oldingi tajribalarda ipsimon nonokristall namunalari yuqori temperaturali GFE usulida olinib, bunda viskerlarning o'sishi komponentalarning bug'dan bevosita tomchiga adsorbsion o'sish bilan sodir bo'lgan. Bunda taglik tomonidan va yon tomonlardan diffuziya uzunligi juda kichik deb olingan.

Lekin hozirgi zamonaviy epitaksiyalar ipsimon nonokristall o'stirish texnologiyalariga difuziya asosiy ro'l oynaydi. Masalan GaAs ipsimon nonokristall olishda sirt harorati  $T=580^{\circ}\text{C}$  ga yakka galiy atomlarining diffuziyasi uzunligi  $\approx 6$  mkm atrofida bo'lgan.

5-rasmlarda- ipsimon nonokristall o'sishning diffuzion mexanizmi asosiy ekanligini ko'rsatuvchi dalillar keltirilgan. O'sishning diffusion rejimida bug'dan tomchiga o'tgan atomlar soni tomchi sirt yuzasiga ( $R^2$ ) proporsional bo'ladi, difuzion oqim bo'lsa ipsimon nonokristall diametriga proporsional. Ikkala mexanizm ham ipsimon nonokristall o'sish tezligiga o'z xissasini qo'shadi.

Keyingi chuqurroq o'rganishlar shuni ko'rsatadiki difuzoin uzunlik  $R_k$  doimiy kattalik emas ekan va ipsimon nonokristallning ko'p parametrlari bilan bog'liq bo'ladi. Ipsimon nonokristallning sof diffuziono'sishi faqat tomchidagi to'yinish bug'dagi va taglikdagito'yinishdan ko'p marta kichik bo'lganida amalgam oshadi.

#### 1.5. elastik kuchlanishlar relaksatsiyasi.

Doid geteropolyar tranzistorlar, va boshqa optoelektron asboblari yasash uchun geterostrukturani ipsimon nanokristall ichida formatlash kerak. Bunda ko'pincha

panjara doimiylari keskin faqr qiluvchi materiallarni moslashtiruvchi sistemalar haqida gap boradi. Geterostrukturalar ikki turi farqlanadi.

1) O'qli: bunda turli material qatlamlari visker o'qi bo'ylab joylashadi.

2) Radial: bunda bir material o'rab olgan holda joylashadi.

Bir o'qli ipsimon nanokristall yarimo'tkazgich geterostrukturalar 12-rasmda keltirilgan. Bunday geterostrukturalar amaliyotda qo'llash uchun istiqbollidir. Chunki ular faqat cho'qqisida emas, balki yuon tomonlarida ham erkin sirtlarga ega.[100] ishda ipsimon nanokristall geterostrukturalardagi dislakatsiyalarqalinligi  $h_c$  ning ipsimon nanokristall radiusi  $R$  va panjaralar nomuvofiqligi  $\epsilon_0$  orasidagi bog'liqligi o'rganilib, undan quyidagicha xulosalar chiqarish mumkin bo'ladi:

— Berilgan  $\epsilon_0$  uchun  $h_c$  ning qiymati  $R$  ga bog'liq holda kamayadi.

—  $R \rightarrow \infty$  da  $h_c$  ikki o'lchamli qatlam uchun kritik qiymatga o'tadi.

— Radiusning  $R_c(\epsilon_0)$  qiymatida kritik qalinlik cheksizlikka intiladi va  $\epsilon_0$  oshishi bilan kamayadi.

Oxirgi natija shuni ko'rsatadiki  $\epsilon_0$  ning berilgan qiymatida ipsimon nanokristall radiusining kritik qiymati mavjud bo'lib, bundan kryingi qiymatda cheksiz qalinlikka ega kogerent qatlamlar o'stirish mumkin emas ekan.

O'qli strukturalarda birinchi yaqinlasdhishta dislokatsion nomuvofiqlikning kritik qalinligi nomuvofiq tagliklarda o'stirilgan ipsimon nanokristallar kritik qalinligiga yaqin bo'lar ekan.

Kritik radiusning mavjudligi Si (111) sirtida III-V birikmalarni o'stirishda ayniqsa muhim bo'ladi. [44] ishdagi izlanishlar shuni ko'rsatadiki, SIG (Si(111) sistemasida 8,1% li panjara nomuvofiqligida Au diametri 20 nm bo'lganida silindrik epitaksion ipsimon nanokristallar o'sar ekan.

Strukturaviy o'rganishlar ipsimon nanokristallning butun uzunligi bo'ylab dislakatsiyalar yo'qligini ko'rsatadi. Tomchi diametric 60 nmga oshganidas dislokatsiyalar paydo0 bo'la boshlar ekan.

Xuddi shuningdek natijalar InAs (Si(111) nomuvofiqlik 11,6%), InP (GaAs(111) nomuvofiqlik 4,1%) bo'lgan hollarda ham kuzatilgan.

Aniqlanishicha ipsimon nanokristall epitaksial qatlamlari kritik diametrlari panjaralar nomuvofiqligi ortishi bilan kamayib boradi va InAs (Si) da 26 nm ni, InP (Si) da 36 nm va InP (GaAs) da 96 nm ni tashkil qiladi.

## **II. Bob. Ipsimon III-V nanokristallarning kristall tuzilishi.**

### **2.1. Ipsimon nanokristallarning o'sish shartlari**

Ma'lumki nitridlardan tashqari barcha III-V tipli yarimo'tkazgich birikmalar o'zgarmas kub kristall panjaraga ega. **(6-rasm)**. Normal sharoitda geksogonal byurtsit panjara hosil bo'lishi mumkin emas. (16 b-rasm). Chunki bunda juda yuqori bosim talab qilinadi. Masalan GaAs da bunday o'tish uchun har adatomga 24 MeV gacha energiya berilishi kerak.

III-V tipli yarimo'tkazgich ipsimon nanokristall strukturalarning o'ziga xosligi shundaki, ularda geksagonal faza namoyon bo'ladi. Bu hol turli usullar bilan o'stirilgan deyarli ko'pchilik ipsimon nanokristallarda (GaAs, Inp, InAs, GaP va hokazo) da paydo bo'lgani aniqlangan.

Olingan strukturalar natijasi atom kuch mikroskoplarida olingan natijalar bilan ham tasdiqlangan. Bunday geksogonal strukturalar stabil bo'lmasdan ba'zan boshqa fazalar paydo bo'lganligi aniqlangan va bu material sifatiga ta'sir qilgan. Shu sababli hozirda ipsimon nanokristallning amaliyotda ishlatishda ular sirti nazorati muhim ahamiyatga ega.

Hozirga kelib III-V birikmalar ipsimon nanokristall strukturalar haqidagi asosiy eksprementlar va nazariy faqtlar quyidagilardan iborat.

1. III-V birikmalarning ipsimon nanokristallari 50-70 nm diametrigacha asosan byurtsit ko'rinishida shakllanadi.
2. Ipsimon nanokristallar diametric mikrometrlar bo'lganda byurtsit faza kuzatilmaydi.
3. HEX strukturaning shakllanishi III-V [70] birikmalar ipsimon nanokristallari uchun maxsus struktura bo'lmay va bu o'stirish texnologiyasiga ham bog'liq emas.

4. Ba'zi hollarda GaAs ipsimon nanokristallarda 4N poli tipi shakllanishi kuzatilib unda ABACABAC qatlamlar ketma-ketligi mavjud bo'ladi.[115]
5. Bu effektini ipsimon nanokristallar tomchisi sirtiga Laplas bosimi bilan tushuntirib bo'lmaydi. Chunki bu bosim fazaviy o'tish bosimidan ikki tartibga ( $\approx 10^2$ ) pastdir.
6. HEX fazali kristallografik poli tipning paydo bo'lishi byurtsit ipsimon nanokristallarda yon sirt energiyasining CUB kristallari ipdan kichik ekanligi bilan tushuntirilishi mumkin.
7. Ipsimon nanokristallarda sirtiy va hajmiy hosil bo'lish energiyasining muvozanati CUB dan HEX ga o'tishning kritik radiusi mavjudligiga olib keladi, lekin bunday hisoblangan radius qiymati tajriba qiymatidan bir tartibga pastdir.
8. GaAs li ipsimon nanokristall o'sish boshida CUB fazada boshlanib, oxirida ( Ga o'tkazish to'xtagandan keyin ) HEX fazada davom etgan bo'lib bu ipsimon nanokristall strukturasi o'sish kinematikasining bevosita ta'siri borligini ko'rsatadi.

Bir jinsli fazaviy tartibli L uzunlikli va R radiusi ipsimon nanokristallar hosil bo'lishining erkin energiyasi ( Gibbs energiyasi ) quyidagi ko'rinishda berilishi mumkin:

$$\Delta G_{rt} = - (\pi R^2 L / \Omega_s) \cdot (\Delta \mu_{vs} + \psi_{rt}) + 2\pi R L \gamma_{rt}$$

Bunda  $\psi_{rt} > 0$  kimyoviy potentsiallar farqi va cub fazasi.  $\gamma_{rt}$ -yon sirt energiyasi poli tipli ipsimon nanokristall (111). Bundan foydalanib ipsimon nanokristall radiusi minimal qiymati uchun ushbu munosabatni olishimiz mumkin.

$$R_{min} = 2\tau / (\Delta \mu / \psi_{Hex} - \alpha_{rt}) \cdot R_0 < R < (1 - \tau) / \alpha_{rt} \cdot R_0 = R_s$$

$R_{min}$ -mavjudligi ipsimon nanokristall uchun Gibbs –Tomson effekti mavjudligi bilan bog'liq ekan.

CUB fazadan politip fazaga o'tishi  $R_s$  kritik radiusi o'stirish sharoitlariga bog'liq bo'lmay,  $\tau$ ,  $\alpha_{rt}$ , va  $R_0$  ga bog'liq. Fazaviy otish faqat  $\tau < 1$  bo'lganda ya'ni hosil bo'lish hajmiy energiyasi sirt energiyasi bilan kompensatsiya qila olganda mumkin bo'ladi

## 2.2. III-V ipsimon nanokristallarning morfologiyasi va strukturasi.

Ipsimon nanokristallar o'sish jarayonini o'rganish va nazariy modellar qurishda morfologiyasini o'rganishda ushbu faqtorlarni hisobga olish zarur.

1. ipsimon nanokristallar tomchisida sirt egrilanishi sababli Gibbs –Tomson effekti [29].
2. O'ta to'yingan eritmadan tomchiga nukleatsiya tabiatini, bu hodisa ipsimon nanokristall sirtida qatlam- qatlam bo'lib, o'sishini ta'minlaydi.
3. Taglik sirtidan ipsimon nanokristall uchiga adatomlarning diffusion transporti [17-22].
4. III-V birikmali ipsimon nanokristallarda HEX byurtsit strukturaning hosil bo'lish mumkinligi [18, 24]

Ushbi faqtorlarni hisobga olgan holda [1] iashda III-V ipsimon nanokristallar shakllanish kinetikasi ko'rib chiqilgan. Bu hol III va V guruh elementlarini atomlarning kimyoviy potentsiallari va boshqa parametrlariga bog'liq holda o'rganilgan.

Uchinchi va to'rtinchi faqtorlarga asosan umuman material bir xil fazada bo'lishi mumkin.

Bug' (V) –uning kimyoviy potentsiali ,  $\mu_v$ ,  $\mu_A$  – kimyovoy potentsialga ega taglik sirtidagi adatomlar .  $\mu_L$ -kimyoviy potentsialli suyuqlik (L). ipsimon nanokristall HEX fazasi (  $\mu_w$ ) , CUB fazadan taglik ( $\mu_s$ ) o'sish jarayoni harakterlantiruvchi termodinomik kuchi bug' va taglik kimyoviy potentsiallari farqi bo'lib, bu kattalik o'sish harorati va o'tkazish tezligiga bog'liq bo'ladi.

$$\Delta\mu_{vs} = E_A + \Delta - K_B T \ln(V_A/V) \quad [120, 124]$$

Bunda  $E_A$ -desorbsiya aktivatsiya hodisasi,  $\Delta$ - sirtidagi yashirin kondensatsiya isiqiligi.  $V_A$ - desorbsiya tezligidagi DDDD ko'paytuvchisi.

Ipsimon nanokristalldan uzoqda joylashgan adatomlar kimyoviy potentsiali uchun ushbu ifoda ishlatiladi.

$$\Delta\mu_{As}^{\infty} = \Delta\mu_{vs} - 2K_B T \ln(\lambda_s^0 / \lambda_s)$$

Bunda  $\lambda_0$ -taglikdagi yakka adatom diffuzion uzunligi,  $\lambda_s$  – nukleatsiyani hisobga olgan holda effektiv diffuzion uzunlik.

Ishlarda  $\lambda_s^0$  va  $\lambda_s$  uchun ushbu ifodalardan foydalanilmoqda

$$\lambda_s^0 = \exp[(E_A - E_D) / 2K_B T]$$

bunda  $E_D$ - to'siq balandligi,  $E_D = 0,4 \text{ eV}$  [79]

$$(\lambda_s^0 / \lambda_s) = 1 + [(2\pi N_* \lambda_s^2) / V_*^2] V_*^2 \exp[(3\Delta + E_A + E_D) / K_B] \cdot (1/T - 1/T_*)$$

Bunda  $\lambda_* = \lambda_s^0(T_*)$ ,  $N_* = N(T_* V_*)$

Ga uchun ushbu kattaliklar qiymati quyidagicha deb olingan. ( $T_* = 550^\circ \text{C}$ ,  $V_* = 1 \text{ MS/s}$ ,  $N_* = 10^8 \text{ sm}^{-2}$ ). Ko'rish mumkinki  $T$  oshishi bilan  $\Delta\mu_{vs}$ - chiziqli kamayar ekan. Bug'ning нгйщкщещэнштшыр sohasida (past  $T$  va yuqori  $V$  larda)  $\Delta\mu_{vs}^\infty$   $\Delta\mu_{vs}$  ga nisbatan juda kichik bo'ladi. Bunga sabab nukleatsiya jarayonidir. Bu jarayon tezligi  $T$  kamaysa oshar ekan va biror haroratda o'zining eng maksimal qiymatiga erishadi. Masalan MPE usulida GaAsda  $V = 0,6 \text{ MS/s}$  maksimal qiymati  $T = 570^\circ \text{C}$  haroratga erishiladi.

Ipsimon nanokristallarni diffusion o'sih faqat

$$\mu_A^\infty > \mu_L(P_L)$$

sirt bosharilgandagina mumkin bo'ladi. Chunki bunda diffusion oqim sirtidan tomchi hajmiga tomon yo'nalgan bo'ladi.

Gibbs-Tomson effekti hisobiga kimyoviy potensial o'zgarishi natijasida va  $\mu_A^\infty$  ning yuqorida keltirilgan ko'rinishidan ipsimon nanokristall shakllarini birinchi sharti

$\Delta\mu_{vs}^\infty = \mu_L^\infty - \mu_s$  ni hisobga olgan holda quyidagi shaklda yoziladi [120]

$$\Delta\mu_{Ls}^\infty < \Delta\mu_{vs} - 2K_B T \ln(\lambda_s^0 / \lambda_s) - 2\gamma_{Lv} \Omega_L \sin\beta / R = \Delta\mu_{\max}$$

Ipsimon nanokristall shakllanishining ikkinchi sharti ipsimon nanokristall uchidagi suyuq eritmadan taglikka adatomlar o'tishining aktivatsion to'siqni kattalashni taxlilidankelib chiqadi. Ko'rsatish mumkinki  $r_i$ - chiziqli o'lchamli tuzilish markazlari hosil bo'lishi erkin Gibbs energiyasi,  $h$ - monoqatlam qalinligi, yuzasi  $A = c_1 r_i^2$  va premetri  $P = c_2 r_i$  suyuq eritmadan o'zgarmas haroratda tomchidan bosim va tomchi markaz sistemasidagi zarralar soni quyidagicha:

$$\Delta G_{\text{wire}} = -[\Delta\mu_{Ls}^\infty - \Psi - 2\gamma_{Lv}(\Omega_s - \Omega_L)\sin\beta / R] \cdot c_1 r_i^2 h / \Omega_s + \Gamma c_2 r_i h$$

$R = \text{const}$  holda izotrop o'sish faqat shu holda mumkin, chunki ipsimon nanokristallning berilgan o'sish tezligi  $dL/dt$  noaktiv sirtning o'sish tezligi  $dL/dt$  dan katta bo'lsa yetarlicha nozik ipsimon nanokristallar faqat monotsentrik mexanizm bo'yicha o'sadi deb hisoblash

$$dL/dt \sim 1/\tau_L (R/L)^2 \exp(-\Delta G_{\text{wire}}/K_B T)$$

bo'ladi. Bunda  $\tau_k$  - suyuq fazadan folgalarning shakllanish vaqti,  $l_0$  - panjara doimiysi taglik faqat politsentrik mexanizm bo'yicha o'sadi. Shunday qilib,

$$dH_s/dt \sim (1/\tau_A) \exp(-\Delta G_{\text{surface}}^*/3KT)$$

bunda  $\tau_A$  - bug'dan adatomlar folgalari shakllanish vaqti. Bularni qatorga yoyib bundan

$$\Delta W_{\text{wire}} < \Delta G_{\text{surface}}^*/3$$

Shartni olishimiz mumkin. Yuqoridagilarni hisobga olib bunday ipsimon nanokristall o'sishi uchun bug' to'yinganligi uchun minimum shartni olishimiz mumkin.

$$\Delta \mu_{Ls}^{\infty} > 3(\Gamma/\gamma_{sl})\Delta \mu_{as}^{\infty} + 2\gamma_{lv}(\Omega_s - \Omega_l)\sin\beta/R + \Psi = \Delta \mu_{\min}$$

Bu shartni faqat ipsimon nanokristall ichidagi folgalar sirt energiyasining qiymati juda kichik bo'lganida bajariladi. Shunday qilib ipsimon nanokristallarni o'sishi eritma to'yinishining ushbu chegaralaridagina bo'lishi mumkin.

$$\Delta \mu_{\min} < \Delta \mu_{ls}^{\infty} < \Delta \mu_{\max}$$

$\Delta \mu_{ls}^{\infty}$  ning qiymati bir tomondan nukleatsiyani oshirish uchun yetarlicha katta bo'lishi kerak bo'lsa ikkinchi tomondan sirtdan diffusion transportni amalgam oshirish uchun yetarlicha kichik bo'lishi kerak.

$\Delta \mu_{\min}$  qiymati o'stirish sharoitlariga bog'liq.

### III. Bob. Ipsimon nanokristallarning qo'llanilishi

#### 3.1. Ipsimon nanokristallar asosidagi maydon emmiterlari.

Oldingi paragraflarda ko'rilganidek Gibbs-Tomson effekti va eritmadan tomchiga nukleatsiya jarayoni kichik  $K$  radiuslarda ipsimon nanokristallar o'sish tezligining kamayishiga olib kelsa, adatomlar diffuziyasi aksincha uning oshishiga olib keladi. Tajribada olingan ko'pgina bog'lanishlar diffusion xarakterga ega bo'lib, (5) ifoda bilan tushuntirilishi mumkin ekan.

Sifatdan jihatdan ipsimon nanokristall uzunligi  $L$  diffusion o'sishda  $1/R$  ga yoki  $1/R^2$  ga proporsional bo'ladi, radius qiymatiga va noaktiv sirtida o'sishga bog'liq holda, lekin bunda boshqa xil rejimlar ham mavjud bo'lishi mumkin [22, 25] ishlarda  $L(R)$  bog'lanish GaAs va AlGaAs ipsimon nanokristallar uchun nazariy va eksperimental o'rganishlar natijalari keltirilgan. Bunda o'sish Au bilan aktivlashtirilgan bo'lib MPE usulida olib borilgan. Biz ikkita namuna uchun natijalarni ko'rib chiqaylik. 1-namuna EP1203 qurilmasida olingan AlGaAs ipsimon nanokristallari bo'lib, ular atomar Ga va As<sub>4</sub> dastasida tayyor taglikka olinib, taglikda dastlab  $d_{Au}=1,25$  nm qalinlikda Au o'tkazilgan bo'lgan( GaAs bu yerda qatlam qalinligi taxminan 300 nm), keyin namuna kameradan olinib, atmosferada qoldirilib, keyin 630°C haroratgacha qizdirilgan. Qizdirish vaqti 5 minutni tashkil qilgan. Shundan keyin qalinligi 725 nm bo'lgan Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As qatlam o'tkazilgan. O'sishda harorat  $T=585^{\circ}\text{C}$  ni tashkil qilgan.

2-namuna GaAs viskerlarini Riber-32 MPE qurilmasida legirlangan  $n^{+}$ -GaAs(111) taglikka o'stirilgan bo'lib, bunda dastlab 170 nm qalinlikdagi buffer qatlami GaAs 640°C haroratda o'tkazilgan. Keyin vakuumni buzmay turib,  $d_{Au}=2$  nm qalinlikdagi Au qatlam o'tkazilgan. O'sish kamerasida sirt 590°C gacha qizdirilib As va Ga dastagidagi 1000 nm qatlamli GaAs o'tkazilgan.

Namunalarning morfologik o'rganishlari rastr electron mikroskopiyasi (PEM) usulida olib borilgan. **7- rasmlarda** 1 va 2 –namunalarning REM tasvirlari berilgan va grafiklarda uzunlikning diametrga bog'lanishi keltirilgan. Shuningdek shu grafiklarda diffusion model bo'yicha hisoblash natijalari ham berilgan.



Grafiklardan ko'rinadiki ikkala holda ham eksperimental chiziqlar  $(\lambda_s/R)^2$  ko'rinishidagi bog'lanishga mos keladi. Tomchidan desorbsiya tezligi o'tkazish mtezligidan 5-7% ni tashkil qiladi. 1 namunada ipsimon nanokristall maksimal uzunligi o'tkazish effektiv qalinligidan 7 marta katta bo'lsa, 2- namunada bu ko'rsatkich 3,2 martani tashkil qiladi.

**6-rasmda** GaN ipsimon nanokristallar uchun PEM tasvir va balandlikning diamtrga bog'lanishi keltirilgan. Radius oshishi bilan balandlikning kamayishi o'sishning diffusion xarakterda ekanligini ko'rsatadi. Bu holda o'sish bog'lanishi  $L=H(1+\lambda_s/R)$  ekanini ko'rish mumkin bo'lar ekan. Bunda  $H=470$  nm va  $\lambda_s=40$  nm bo'lgan Si sirtida ho'llovchi GaN qatlam hosil bo'lganligi kuzatilgan. Olingan natijalar Gibbs –Tomson effektining MEP da ipsimon nanokristall o'stirishda ta'siri yo'q ekanligini ko'rsatadi.

Sirtida diffuziya va Gibbs –Tomson effekti ta'siri mavjudligi haqida ipsimon nanokristall o'sishi mexanizmi kichik radiuslarda MOSVD metodi bilan InAs ipsimon nanokristallari uchun [28] ishda o'rganilgan.

Bu ishda natijalarga kora  $dL/dt$  o'sish tezligining radiusga bog'lanishi funksiyasi bitta maximumga ega funksiya ko'rinishda bo'lishi mumkin. Bu bog'lanish o'zgarmas o'tkazish tezligi va turli harirlarda 26-rasmlarda keltirilgan.

Kichik R lar sohasida R oshishi Gibbs-Tomson effekti bilan chegaralanadi va ipsimon nanokristall uznligi R oshishi bilan oshib boradi.

$R_{GT}/R \ll 1$  sohada o'sish adatomlar diffuziyasi bilan bog'liq bo'ladi. Maksimum Gibbs-Tomson effekti va diffuziya raqobati natijasida erishiladi. Ipsimon nanokristall o'sishi mumkin bo'lgan minimal radius

$$R_{\min} = (2\gamma_{lv}\Omega_l \sin\beta / (\Delta\mu_{as}^{\infty} - \Delta\mu_{ls}^{\infty}))$$

Bilan aniqlanadi. InAs holida bu namuna radiusi taxminan 8 nm ni maksimal radius esa 14-16 nm ni tashkil qilgan.

### 3.2. ipsimon nanokristallar morfologik parametrlarining haroratga bog'lanishi.

Ipsimon nanokristall uzunligi va radiusning taglik haroratiga bog'lanishini o'rganishda ko'pincha ipsimon nanokristallning butun uzunligi bo'ylab harorat o'zgarmas va taglik haroratiga teng deb hisoblanadi. [27,28] ishlarda aniqlanishicha bu fikr ipsimon nanokristall uzunligi taxminan 10 mkm bo'lgan hollardagina o'rinli bo'lar ekan. Agar ipsimon nanokristall uzunligi bundan yuqori bo'lsa ipsimon nanokristall uchlaridagi harorat Stefan-Bolsmon nurlanishiga asosan tagliknikidan farq qilar ekan. Bunday hol [9] ishda GFE usulida ipsimon nanokristall o'stirish chog'ida ham hisobga olingan.

Yuqoridagi ishlardan olingan natijalar asosida ipsimon nanokristall uzunligi bo'ylab harorat taqsimoti haqida ushbu xulosalarni berish mumkin.

- uzunlik ortishi bilan visker uchi harorati pasaya boradi. Shuni ko'rsatish mumkinki  $L \rightarrow \infty$  da harorat  $T_{\infty} = (\epsilon_B/2)^{1/4} T_s$  chegaraviy qiymatga intiladi. bunda  $T_s$ -taglik harorati,  $\epsilon_A$ - yutish koeffitsienti.
- Haroratning taglikkacha masofaga bog'lanish  $T(z)$  hamisha kamayuvchi funksiya bo'ladi.
- Fikserlangan  $z$  da bu nuqtadan harorat ipsimonnanokristall uzunligi ortishi bilan kamayib boradi.

Odatiy o'stirish usullarida va sharoitlarida masalan MEP da GaAS ipsimon nanokristall o'stirishda  $T_s=550^{\circ}\text{C}$ ,  $R=10\text{ nm}$ ,  $L=15\text{mkm}$  holda visker uchidagi va asosidagi harorat lar farqi  $10^0\text{ c}$  ni tashkil qiladi. (27-rasm).  $T_s=\text{const}$  deb olib, o'sish tezligining haroratga bog'lanish diffusion mexanizmidagi bog'lanishi (17) formula asosida hisoblash mumkin. Bu bog'lanishlarning odatiy shakli 28-rasmda berilgan. Bunda o'tkazish tezligi bir xil va  $R$  har xil qiymatga ega.

Ko'rinib turibdiki  $L(T)$  bog'lanish bir maksimumi funksiya shaklida bo'lar ekan. Bundamaksimum holati  $R$  ga bog'liq bo'lar ekan. Ipsimon nanokristall radiusi kamayishi bilan o'sishning tempera diagonali kamayib boradi. O'sish to'xtaydigan eng kichik harorat evtektik o'sish haroratda ancha yuqori bo'ladi. Shunday past temperature bu tomchi qotishi bilan bog'liq emas ekan. O'sish sharoiti to'xtashiga

noaktivsirtlarga intensive nukleatsiya bo'lishi bilan bog'liq bo'lar ekan. Bu hol adatomlarning ipsimon nanokristallar asosiga diffusion haroratni chegaralaydi.

O'sishning mumkin bo'lgan eng yuqori harorati qiymati tomchidagi effektiv to'yinishning kamayishi bilan tushuntiriladi.

L(T) bog'lanishning bunday karakteri turlli usullar bilan o'stirilgan ipsimon nanokristallarni o'rganish natijalari bilan mos keladi. [52] ishda GaAs ipsimon nanokristallar morfologiyasining haroratga bog'lanishi juda keng o'rganilgan. O'stirish sharoiti oldin ko'rilganidek uch bosqichda olib borilgan.

Sirtni kuydirishdan keyin atom-nur mikroskopida o'rganish unda o'lchami 10-50 nm bo'lgan tomchilar paydo bo'lganini ko'rsatadi.  $T=520^{\circ}\text{C}$  bo'lganda qaytgan elektronlar diffuziyasi bilan o'rganish ko'rsatishicha sirtida (1x1), (2x2) rekonstruksiylar paydo bo'lar ekan. Haroratni pasaytira boshlasak sirtida nuqtaviy nuqsonlar paydo bo'la boshlar ekan. T harorat  $400^{\circ}\text{C}$  ga ko'tarilsa, bu qo'shimcha reflekslar yo'qolar ekan. Bu nuqtaviy defektlar kataliztorning uch o'lchamli zarralardan diffuziya natijasi bo'lishi mumkin ekan.

Shunday qilib in Situ metodi bilan ko'rsatishicha  $T<340^{\circ}\text{C}$  bo'lganda tomchilar qattiq,  $T>400^{\circ}\text{C}$  da esa ular suyuq holatda bo'lar ekan. Oraliq holatda suyuq- qattiq jism fazaviy o'tishlar gisterezisi kuzatilar ekan.  $T<340^{\circ}\text{C}$  bo'lgan past harorat hajmiy eritma Au-Ga ning evtektik haroratga mos keladi.

$V=0.2\text{ nm/s}$  o'stirish tezligi va turli haroratlarda GaAs ni o'tkazish quyidagi natijalarga olib keladi.  $T=300^{\circ}\text{C}$  da Au ning barcha zarralari atrofida g'ovak GaAs qatlam o'sadi, ipsimon nanokristall o'sishi kuzilmaydi. (31-a- rasm).

Gisterezis sohasida (  $T=370^{\circ}\text{C}$  ) (31-b-rasm) ipsimon nanokristall shakllanadi, keyin ularning o'sishi stabil emas.

$T=420^{\circ}\text{C}$ - $620^{\circ}\text{C}$  diapozonda ipsimon nanokristallarning stabil o'sishi kuzatiladi.  $T=420^{\circ}\text{C}$  larda ipsimon nanokristallar o'sishi konussimon (31-c-rasm) Toshib  $T=580^{\circ}\text{C}$  da esa ular silindrik shaklga keladi (31-d- rasm).  $T>620^{\circ}\text{C}$  da ham ipsimon nanokristallar hosil bo'lmas ekan.

#### **4. ipsimon nanokristallar xossalari va qo'llanilishi.**

Keyingi yillarda ipsimon nanokristallarga bag'ishlangan bir qator izlanish ularning antiq xossalariga bag'ishlangan. Bunday ipsimon nanokristall GFE, MFE, va MHE usullari bilan o'stirilmoqda. Ipsimon nanokristall antiq xossalari dastlab GaAs li ipsimon nanokristallar uchun bag'ishlangan. P-n GaAS ipsimon nanokristallarning diametr 14-30 nm atrofida bo'lib, ularda fotolyuminenissensiya maksimumlari qisqa to'lqin sohasiga siljiganligi aniqlandi. Hajmiy kristallarga nisbatan bu hodisa ipsimon nanokristallarda eksprementlarning kvantlanishi bilan tushuntirilgan. Bunda olingan nurlanish qutblangan holda bo'lishi ham aniqlangan. Bu qutblanish ipsimon nanokristall yo'nalishiga parallel va perpendikulyar yo'nalishlarga mavjud bo'lgan.

Keyinchalik ipsimon nanokristallar nurlanish samaradorligini oshirish uchun ularni kengroq zonali materiallarda o'stirish kerak ekanligi aniqlandi. Bunda GaAS/ AlGaAs sistemasi ishlatilgan. [12] ishda InP/ Si sistemasida olingan ipsimon nanokristallarning mikro FL berilgan bo'lib, unda malohida ipsimon nanokristallarning 5 ta piklari yaqqol ko'rinib turibdi (44-rasm). bu FL spektri hajmiy InP kristallanishdan 178 Mev ga qisqa to'lqin sohasiga siljiganligi aniqlandi.

Ipsimon nanokristallar o'stirishda yana bir rivojlanish bosqichi keng zonali ipsimon nanokristallda torroq zonali ipsimon nanokristallar o'stirish mumkinligi ko'rsatilgach namoyon bo'lgan.

Keyingi yillarda azot asosidagi ipsimon nanokristallarning antiq xossalariga bag'ishlangan ko'plab ishlar paydo bo'ldi. Bunga chiziqli bunga nurlanish keng diapozonda bo'lib infraqizildan to ultrabinafsha sohagacha egallaydi.

Buning yana bir afzalligi bunda metal katalizator talab qilmaydi. InN li kristallarda ipsimon nanokristall kristall tuzilish hajmi InN nikidan farq qilmasligi ham aniqlangan'

Ko'p ishlarda GaAsli ipsimon nanokristallarga lazer nurini ta'siri ham o'rganilgan. Ikinchi tomondan ipsimao nanokristallarning elektrofizik va transport xossalari ham juda qiziqarli va ahamiyatlidir. Chunki bunda ipsimon nanokristall

asosida juda kichik o'lchamli elektrofizik asboblari yasash imkonini paydo bo'ladi. Qizig'i shundaki ularda bir qator qiziqarli elektr xossalari yuzaga kelar ekan. Masalan InAs ipsimon nanokristallar ham n-tip o'tkazuvchanlikka ega bo'lar ekan va ratvorga berilgan kuchlanishga bog'liq holda o'tkazuvchanlik besh tartibga o'zgarishi mumkin ekan. Izlanishlar asosida InAs ipsimon nanokristallarda vertical maydon tranzistorlari yaratilgan (**49- rasm**).

Bunday tranzistorlardan yana biri bu Si/SiO<sub>2</sub> li va ZnO li nanotranzistorlardir. Lekin bu sohada muammolardan biri bu ipsimon nanokristallari boshqariladigan legirlashni amalgam oshirishning murakkabligidir.

Ipsimon nanokristallar olish yana zarur magnet xossalarga ega materiallar olish imkonini ham beradi.

Ipsimon anokristallar asisidagi maydon emmitterlari ham ahamiyatlidir. O'zining vertical strukturasi bilan ipsimon nanokristallar ular asosida maydon katodlarini tasash uchun ishlatilishi mumkinligini ko'rsatadi. Shu maqsadda ipsimon nanokristallarning emission xossalari o'rganilmoqda. Bu maqsadda olingan GaAs ipsimon nanokristallar bevosita GaAs tezlikka o'stirilgan bo'lib o'rganildi. 15-100 nm intervarda bo'ladi. Olingan namunalarda electron emissiyasi o'rganildi. Bunda electron emissiyasida tunnel xarakteri ham mavjudligi ko'rsatilgan. Bu holler ipsimon nanokristallardan samarador maydon emmitterlari olishda foydalanish mumkinligini ko'rsatadi.

### **3.2 Fotoelektrik o'zgartirgichlar.**

Hozirda ipsimon nanokristallardan foto o'zgartirgichlar optic elementlari sifatida foydalanishga qiziqish ortmoqda. Bunda Si, CdSe ZnO, GaAs kabi materiallardan keng foydalanilmoqda. Bunga sabab keyingi foto o'zgartirgichlarda nanoo'lchamli effektlardan keng foydalanilmoqda. Ipsimon nanokristalli foto elementlar bahosi ancha pastligiga sabab materiallar sarfi juda kamligi va ularda ko'p fotonli effektlar keng qo'llaniladi. [24] ishda dastlabki ipsimon nanokristalli FEP lar oloinib Si dan tayyorlangan edi. Ularning foydali ish koeffitsienti (FIK) 15-18% atrofida bo'lgan. **55-rasmda** po'lat taglikka olingan Si ipsimon nanokristalli quyosh elementi sxemasi berilgan. Uning asosiga

100 nm qalinlikda Ta<sub>2</sub>N plyonka o'tkazilgan. Bu pastki omik kontakt vazifasini bajaradi. Undan yuqorida p-tip Si ipsimon nanokristallar o'stirilgan. Uning ustiga bir qancha texnologik jarayondan keyin  $\alpha$ -Si qatlam olingan.(~40 nm). Bunda p-n o'tishda sirtiy rekombinatsiya jarayonlari kamayadi.uning ustiga IPO kontakt olinadi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, bu yo'l bilan olingan FEP larda qaytish koeffitsianti bir necha tartibga past bo'lib FIK oshishiga olib keladi. Bu xossa uning geometrik tuzilishi bilan bog'liq. **56-rasmda** ipsimon nanokristalli va planar texnologiyada olingan FEP larning tomchi ko'rinishlari berilgan.

Bundan ipsimon nanokristalli FEP larning asosiy xossalari quyidagilar. Har bir 1,8 m<sup>2</sup> yuzaga ~3 mA tok generatsiyalanadi. Bunda ochiq zanjirdagi kuchlanish 130 mVni tashkil qiladi. Bunda ipsimon nanokristalli foto o'zgartirgichlar integral koeffitsienti kichikligiga qaramay ularning keng spectral diapozonda ishlay olishi jihatidan ahamiyati katta (**57-rasm**) bu shuni ko'rsatadiki, ipsimon nanokristalli foto o'zgartirgichlarda fotovoltaik effekti asosan Si li ipsimon nanokristall massivlarida yorug'likning yutilishi bilan bog'liq. 12 % ga eng yuqori effektivlik  $\lambda=690$  nm to'lqin uzunligida kuzatiladi.[25] ishda p-n tipli radial ko'rinishdagi GaAs li ipsimon nanokristall asosidagi FEP lari o'rganilgan. Bunda ular Au bilan aktivlashtirilgan va legirlash Te atomlarida amalgam oshirilgan. Bunday FEP larning samaradorligi ham ancha yuqoriligi aniqlangan.

— Ipsimon nanokristall asosidagi asboblarni nanosensorlar sifatida ham ishlatilmoqda. [26] ishda yarim o'tkazgich ipsimon nanokristallarning turli xil kimyoviy va biologic ob'ektlarni aniqlovchi nanosensorlarning aktiv elementlari sifatida ishlatish mumkinligi o'rganilgan. Unda masalan Si li ipsimon nanokristallar alohida viruslarni elektrik detektorlash uchun ishlatish masalasi o'rganilgan. Viruslar kristallanishning asosiy sababi bo'lib, keyingi yillarda ularni biologik qurollarda ham ishlatilmoqda.

Hozirgi kunda bunday kam miqdorli viruslarni aniqlaovchi metodida juda murakkab va ko'p vaqt talab qilar edi.

Bunda mikro molekulalarni adsorbsiyasi natijasida o'z qarshiligini o'zgartiruvchi ipsimon nanokristallardan kelgan signallardan foydalanidsh yana bir yangi metod

hisoblanadi. [11] ishda Si li ipsimon nanokristallar ishlatilib, ularning diametrlari ~ 20 nm atrofida bo'lgan. Bunda ipsimon nanokristallar antijismlar (masalan A gripp antigemaglutin) bilan modifikatsiya qilinadi. Bunda antijismlar zichligi reaksiya vaqtiga bog'liq holda o'rgandi. Bu detector sxemasi 61-rasmda keltirilgan viruslardan antijismlar bilan bog'lanishi sirtida o'tkazuvchanligi oshishiga olib kelib buni qayd qilinadi.

1. В.Г. Дубровский, Г.Э.Цырлин, В.М.Устиной. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: ФТП, 2009, том 43, вып. 12
2. [1] Н. Sakaki. Jpn. Appl. Phys., 19, L735 (1980).

3. [2] R.S.Wagner, W.C.Ellis. Appl. Phys. Lett., 4, 89 (1964).
4. [3] Е.И. Гиваргизов. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара (М., Наука, 1977).
5. [4] P.M. Petroff, A.C. Gossard, W. Wiegmann. Appl. Phys. Lett., 45, 620 (1984).
6. [5] R. Bhat, E. Kapon, S. Simhony, E. Colas, D.M. Hwang,
7. N.G. Stoffel, M.A. Koza. J. Cryst. Growth, 107, 716 (1991).
8. K. Hiruma, M. Yazawa, T. Katsuyama, K. Ogawa,
9. K. Haraguchi, M. Koguchi. J. Appl. Phys., 77, 447 (1995).
10. Y. Cui, C.M. Lieber. Science, 91, 851 (2001).
11. G. Zheng, W. Lu, S. Jin, C.M. Lieber. Adv. Mater., 16, 1890 (2004).
12. A.B. Greytak, L.J. Lauhon, M.S. Gudiksen, C.M. Lieber.
13. Appl. Phys. Lett., 84, 4176 (2004).
14. [10] Y. Huang, C.M. Lieber. Pure Appl. Chem., 76, 2051 (2004).
15. E. Patolsky, G. Zheng, O. Hayden, M. Lakadamyali,
16. X. Zhuang, C.M. Lieber. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 101, 14 017 (2004).
17. R.S. Friedman, M.C. McAlpine, D.S. Ricketts, D. Ham, C.M. Lieber.
- Nature, 434, 1085 (2005).
18. Y. Li, J. Xiang, F. Qian, S. Gradecak, Y. Wu, H. Yan,
19. D.A. Blom, C.M. Lieber. Nano Lett., 6, 1468 (2006).
20. S. Gradecak, F. Qian, Y. Li, H.G. Park, C.M. Lieber. Appl. Phys. Lett., 87,
- 173 111 (2005).
21. F. Patolsky, G.F. Zheng, C.M. Lieber. Anal. Chem., 78, 4260 (2006).
22. O. Hayden, G.F. Zheng, P. Agarwal, C.M. Lieber. Small, 3, 2048 (2007).
23. J. Xiang, W. Lu, Y.J. Hu, Y. Wu, H. Yan, C.M. Lieber. Nature, 441, 489 (2006).
24. F. Patolsky, G. Zheng, C.M. Lieber. Nanomedicine, 1, 51 (2006).
25. G.C. Liang, J. Xiang, N. Kharche, G. Klimeck, C.M. Lieber, M.
- Lundstrom. Nano Lett., 7, 642 (2007).
26. [20] W. Lu, C.M. Lieber. Nature Mater., 6, 841 (2007).
27. [21] B.J. Ohlsson, M.T. Björk, M.H. Magnusson, K. Deppert, L.



- Samuelson. Appl. Phys. Lett., 79, 3335 (2001).
- 28.[22] M.T. Bjork, B.J. Ohlsson, T. Sass, A.I. Persson, C. Thelander, M.H. Magnusson, K. Deppert, L.R. Wallenberg,
- 29.L. Samuelson. Appl. Phys. Lett., 80, 1058 (2002).
- 30.[23] M.T. Bjork, B.J. Ohlsson, C. Thelander, A.I. Persson, K. Deppert, L.R. Wallenberg, L. Samuelson. Appl. Phys. Lett., 81, 4458 (2002).
- 31.[24] B.J. Ohlsson, M.T. Bjork, A.I. Persson, C. Thelander, L.R. Wallenberg, M.H. Magnusson, K. Deppert, L. Samuelson. Physica E, 13, 1126 (2002).
- 32.[25] K.A. Dick, K. Deppert, M.W. Larsson, T. Martensson, W. Seifert, L.R. Wallenberg, L. Samuelson. Nature Mater., 3, 380 (2004).
- 33.[26] J. Johansson, L.S. Karlsson, C.P.T. Svensson, T. Martensson, B.A. Wacaser, K. Deppert, L. Samuelson, W. Seifert. Nature Mater., 5, 574 (2006).
- 34.[27] T. Bryllert, L.E. Wernersson, T. Lowgren, L. Samuelson. Nanotechnology, 17, S227 (2006).
- 35.[28] T. Martensson, P. Carlberg, M. Borgstrom, L. Montelius,
- 36.W. Seifert, L. Samuelson. Nano Lett., 4, 699 (2004).
- 37.[29] W. Seifert, M. Borgstrom, K. Deppert, K.A. Dick,
- 38.J. Johansson, M.W. Larsson, T. Martensson, N. Skold,
- 39.C.P.T. Svensson, B.A. Wacaser, L.R. Wallenberg, L. Samuel-
- 40.son. J. Cryst. Growth, 272, 211 (2004).
- 41.[30] A.I. Persson, M.W. Larsson, S. Stengstrom, B.J. Ohlsson,
- 42.L. Samuelson, L.R. Wallenberg. Nature Mater., 3, 677
- 43.(2004).
- 44.[31] C. Thelander, H.A. Nilsson, L.E. Jensen, L. Samuelson. Nano
- 45.Lett., 5, 635 (2005).
- 46.[32] H.A. Nilsson, C. Thelander, L.E. Froberg, J.B. Wagner,
- 47.L. Samuelson. Appl. Phys. Lett., 89, 163 101 (2006).
- 48.[33] K.A. Dick, K. Deppert, T. Martensson, S. Mandl, L. Samuel-

49. son, W. Seifert. Nano Lett., 5, 761 (2005).
- 50.[34] A.I. Persson, L.E. Froberg, S. Jeppesen, M.T. Bjork,
- 51.L. Samuelson. J. Appl. Phys., 101, 034 313 (2007).
- 52.[35] D. Li, Y. Wu, P. Kim, P. Yang, A. Ma jumdar. Appl. Phys.
- 53.Lett., 83, 3186 (2003).
- 54.[36] D. Li, Y. Wu, P. Kim, L. Shi, P. Yang, A. Majumdar. Appl.
- 55.Phys. Lett., 83, 2934 (2003).
- 56.[37] A.I. Hochbaum, R. Fan, R. He, P. Yang. Nano Lett., 5, 457
- 57.(2005).
- 58.[38] P.J. Pauzauskie, P. Yang. Mater. Today, 9 (10),36(2006).
- 59.[39] M. Law, L.E. Greene, A. Radenovic, T. Kuykendall,
- 60.J. Liphardt, P. Yang. J. Phys. Chem. B, 110, 22 652 (2006).
- 61.[40] R. Fan, P. Yang. Nano. Lett., 6, 973 (2006).
- 62.[41] P.Pauzauskie,D.Sirbul,P.Yang.Phys.Rev.Lett.,96,
- 63.143 903 (2006).
- 64.[42] Y. Nakayama, P.J. Pauzauskie, A. Radenovic, R.M. Onorato,
- 65.R.J. Saykally, J. Liphardt, P. Yang. Nature, 447, 1098 (2007).
- 66.[43] C.Y. Zhi, X.D. Bai, E.G. Wang. Appl. Phys. Lett., 86, 213 108
- 67.(2005).
- 68.[