

# InGaAs/InAlAs quantum well дэх цахиурын атомын хольцын нөлөө

О.Оюун-Эрдэнэ<sup>1\*</sup>, Ж.Биазиол<sup>2</sup>, Г.Тамираа<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Хими Биологийн Инженерчлэлийн Тэнхим, Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан, Инженерчлэлийн Сургууль, МУИС

<sup>2</sup> IOM CNR, TASC лаборатор, Шинжлэх Ухааны Парк, Триесте, Итали

Бид энэхүү ажлаар InGaAs/InAlAs quantum well (QW)-д дельта хэлбэрийн цахиурын атомын хольц хийсэн ба QW ба цахиурын атомын хольцын үе хоорондын зайг 5 – 45 нм хүртэл өөрчлөн цахиурын атомын хольцыг QW-н дээр, доор байрлуулан тооцоо хийж, хольцын концентрацийг өөрчлөн QW дахь цэнэгийн концентрацид хэрхэн нөлөөлөхийг судлав. Үүнээс цахиурын атомын хольцыг QW-с холдуулах тусам электроны концентраци буурч байсан ба QW-н дээр хольцыг байрлуулахад шугаман хамааралтай ба хольцын концентраци ихсэхэд QW дотор үүсэх цэнэгийн хэмжээ ихсэж байгааг харууллаа.

Түлхүүр үг: Quantum well, цахиурын атомын хольц, x-гау детектор.

## ОРШИЛ

Сүүлийн жилүүдэд quantum well (QW) дээр суурилсан дэвшилтэт төхөөрөмжүүд нь лазерын хэрэглээнд болон фотоны бүртгэгчид ашиглах судалгаа ихээр хийгдэж байна. InP суурь дээр ургуулсан гетеро-бүтэцтэй InGaAs/InAlAs QW нь өндөр давтамжтай орны-эффект бүхий high-electron-mobility transistor (HEMT)-т ашиглагддаг [1,2]. Харин GaAs суурь дээр ургуулсан InGaAs/InAlAs QW-г ашиглан өргөн мужийн рентген цацрагийн байрлал тодорхойлох фотон бүртгэгчээр ашиглах боломжтой нь харагдсан [3-5]. QW төхөөрөмж нь бага хориотой бүсийн энергитэй, цэнэгийн хөдлөх чадвар өндөртэй шинж чанараараа X-ray мужид хурдан бөгөөд өндөр мэдрэмжтэй сенсор гэдэг нь дээрх судалгаануудад тогтоогджээ. Метаморфик шинжтэй QW төхөөрөмжийг хэт өндөр вакуумд ( $10^{-9}$  мбар) атомын түвшинд хянан нимгэн үеийг ургуулах арга буюу Molecular Beam Epitaxy (MBE)-аар GaAs суурь дээр үе үеэр нь ургуулж үүсгэдэг [6,7]. 2 талаасаа потенциал саадаар хашигдсан QW дотор 2 хэмжээст чөлөөт электрон хий (2ХЧЭХ)-г үүсгэсэн нь энэхүү төхөөрөмжийн гол давуу тал юм [8]. QW доторх цэнэг зөөгчүүд квант потенциалд хязгаарлагдан квантчилагдаж энергийн түвшнүүдэд хуваагдана. Хэдий тийм боловч потенциал нүх дотор үүссэн цэнэгийн популяци, түүний шинж чанарыг төдийлөн судлаагүй байна.

Бид өмнөх судалгаагаараа QW-н өргөнийг 5 – 45 нм хүртэл өөрчилж Шредингерийн тэгшитгэлийг 1 хэмжээст тохиолдолд бодон долгион функц, хувийн утга, электроны концентрацийг тооцоолсон [9]. QW-г өргөсгөх тусам электроны концентраци өсч байгаад тодорхой утгаас эхлэн тогтмолжиж эхэлсэн юм. Иймээс ажлын үр дүнд туршилтаар ургуулахад хамгийн тохиромжтой QW-н өргөнийг 20 – 30 нм гэж тогтоосон [9].

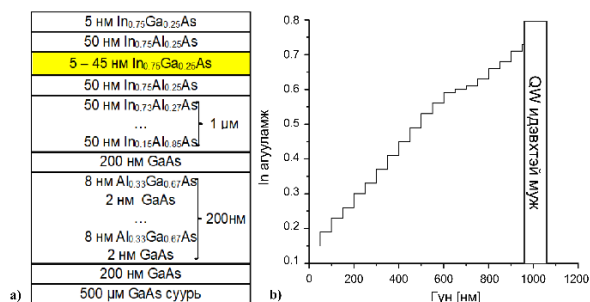
Дараагийн шатанд QW дэх цэнэгийн концентрацид цахиурын атомын хольц хэрхэн нөлөөлж буйг судаллаа. Цахиурын атомууд нь потенциал нүх рүү электроны хольцыг хийж цэнэгийн концентрацийг ихэсгээд зогсохгүй, хянах боломжийг олгож болох юм. Тиймээс, эхлээд QW-н дээр болон доор нь 5 – 45 нм зайтайгаар цахиурын атомын хольц нэмж, тохиромжтой байрлал болон зайг нь тооцоолсны дүнд цаашид цахиурын атомын хольцыг QW-н дээр байрлуулж тооцохоор сонголоо. Түүнчлэн бодит ургалтын нөхцөлд оруулсан цахиурын атомын концентрацийн утгуудыг авч тооцоолон харьцуулсан үр дүнг энэхүү судалгааны ажилдаа танилцуулж байна.

## ТӨХӨӨРӨМЖИЙН БҮТЭЦ

MBE-д 500μм зузаантай GaAs дээр ургуулсан InGaAs/InAlAs QW төхөөрөмжийн үелсэн бүтцийг Зураг 1-д үзүүлэв. GaAs суурьд үүсэх эффектүүдийг багасгахын тулд дээр нь 200 нм AlGaAs/GaAs суперлаттис (SL)-ыг ургуулсан. Цаашлаад  $In_xAl_{x-1}As$  буфер үеийн  $In_x$ -н

\* Electronic address: oyunerdene0927@gmail.com

агууламжийн  $x$ -г 0.15 – 0.75 хүртэл шатлалаар ихэсгэн ургуулсан нь торын параметрийн зөрүүнээс үүссэн харьцангуй суналтын энергийг арилгах зорилготой [10]. Дараагаар нь 25 нм өргөн InGaAs QW, 50 нм өргөн InAlAs хоёр үеийн дунд ургуулсан.



Зураг 1. а) Төхөөрөмжийн бүтэц б) буфер давхаргын In агууламжийн шаталсан бүтэц.

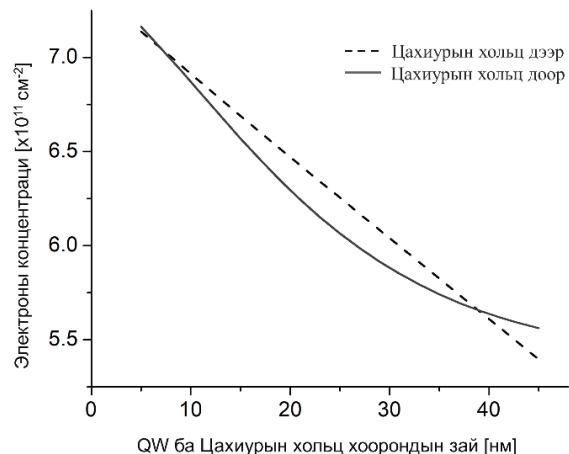
## ТООЦООЛЛЫН ХЭСЭГ

Шинэ судлагдаж байгаа төхөөрөмжийн хувьд тохиромжтой горимыг тогтоох, шинж чанарыг судлахад загварчлал хийх нь хамгийн чухал процесс юм. Цахиурын атомын хольцын нөлөөллийг тодорхойлохын тулд 1D Poisson Schrodinger solver-г ашиглан квант механикийн тооцоог хийлээ [11]. QW-н дээр болон доор нь 5 – 45 нм зайтайгаар цахиурын атомын хольцыг байрлуулж, цэнэгийн концентрацийг тооцсон. Улмаар бодит ургалтын нөхцөлөөс цахиурын агууламжийг аван тооцооллыг гүйцэтгэв. Тооцооллын пакежид InGaAs, InAlAs материалыг шинээр нэмж оруулсан ба InGaAs-н электроны хөдлөх чадварыг туршилтын утгаас авч, бусад параметруудийг (электрон, нүхний масс, бүсийн оффсет (band offset) гэх мэт) потенциалд нэмсэн. Загварчлал хийхдээ QW төхөөрөмжийн давхаргыг туршилтаар МВЕ-д ургуулсантай ижил байхаар кодолсон. Бүх тооцооллыг тасалгааны температурт явуулав.

## ҮР ДҮНГИЙН ХЭСЭГ

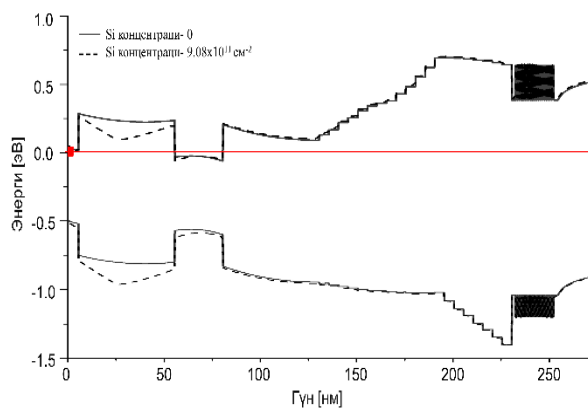
Бид эхлээд цахиурын атомын хольцын концентрацийг тогтмол хадгалж QW-н дээр, доор байрлуулсан. QW ба хольцын хоорондох зайг 5 – 45 нм хүртэл өөрчлөн тооцоолсон графикийг Зураг 2-т харуулав. Графикаас харахад цахиурын атомын хольцыг дээр нь өгч тооцоход цахиурын атомын хольцын үе нь QW-с холдох тусам түүнд үүсэх электроны

концентраци шугаман хамаарлаар буурч байгаа нь ажиглагдлаа. Харин доор байрлуулахад шугаман бус хамааралтай байна. Үүнээс бид цаашдын тооцоонд цахиурын атомын хольцыг зөвхөн QW-н дээр байрлуулж тооцохоор сонгосон.



Зураг 2. Цахиурын атомын хольцыг QW-н дээр болон доор байрлуулж мөн хоорондох зайг өөрчлөн тооцоолсныг харуулсан график.

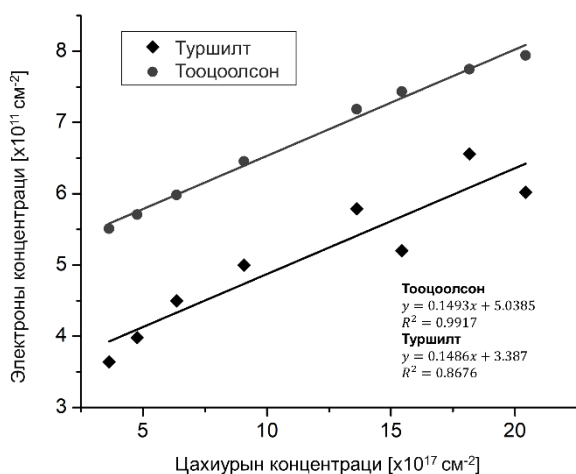
Цахиурын атомын хольцын концентрацийг өөрчлөн тооцсон QW-н бүсийн диаграммыг Зураг 3-т дүрслэв. Хольцын концентраци ихсэх тусам хотойж, валентын бүс болон дамжуулалтын бүс ферми түвшинтэй ойртож байгаа нь харагдаж байна. QW дотор үүсэх ёстой 2ХЧЭХ нь ферми түвшнээс доош орсон QW-н хэсэгт үүссэн нь харагдаж байна. Мөн  $In_xAl_{x-1}As$  давхаргын In-н шаталсан концентрацийн өөрчлөлт болон AlGaAs/GaAs-н суперлаттисын давхарга гарсан байна.



Зураг 3. Цахиурын атомын хольц QW-н бүсийн диаграммд нөлөөлөх нь.

Туршилтад ашигласан  $0-1.02 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  утгын муж дахь цахиурын атомын хольцын концентрацийн утгыг авч тооцооллыг гүйцэтгэв.

Туршилтын ба тооцооллын үр дүнг харьцуулан Зураг 4-т харуулж байна. Цахиурын хольцийн концентраци ихсэхэд потенциал дотор үүсэх электроны концентраци өссөн үр дүн гарсан бөгөөд туршилтын утгуудтай ижил зүй тогтолтой байлаа. Цаашид туршилтаар ургуулах төхөөрөмжийн цэнэгийн концентрацийг цахиурын атомын хольцоор удирдан тохируулж боломтой байна. Түүнчлэн нарийн төвөгтэй ургалтын процесс бүхий өндөр өртөгтэй дээжүүдийн олон дахин ургуулалгүй тохирох хольцын концентрацид харгалзах цэнэг зөөгчийн утгыг урьчилан тооцоолж тохируулах болно.



Зураг 4. Цахиурын атомын хольцын концентраци ба QW доторх электроны концентрацийн хамаарлыг онолын тооцоолол ба туршилтын утгатай харьцуулсан график.

## ДҮГНЭЛТ

QW-д цахиурын атомын хольцын концентрацийг тогтмол өгч хооронд дахь зайг өөрчлөн, QW-н дээр доор байрлуулан тооцоход, цахиурын атомын хольцыг дээр нь өгсөн нь шугаман хамаарлаар буурч байсан учраас цаашдын тооцоонд дээр нь байрлуулж байх нь тохиромжтой гэж үзэж байна. Цаашилбал туршилтад ашигласан цахиурын атомын хольцын концентрацийн утгыг авч тооцооллыг гүйцэтгэхэд бүсийн диаграмм нь хольцын концентраци нь ихсэх тусам хотойж, ферми түвшинтэй ойртож байгаа нь харагдлаа. Туршилтын болон тооцооллын үр дүнг харьцуулан харахад хольцын концентрацийг ихэсгэх тусам QW доторх электроны концентраци өсөж байгаа нь туршилтаар ургуулах гэж буй QW-н электроны

концентрацийг урьдчилан тооцож тохируулах боломжтой болж байна.

## ТАЛАРХАЛ

Энэхүү ажлыг гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлж P2017-1322 төслийг санхүүжүүлсэн Азийн Хөгжлийн Банканд талархал илэрхийлье.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] E. Y. Chang et al., Appl. Phys. Express 6, 034001 (2016).
- [2] J. A. del Alamo, Nature 479, 317 (2011).
- [3] M. Antonelli et al., Fast board-band photon detector based on quantum well devices and charge-integrating electronics for non-invasive FEL monitoring, AIP Conference Proceedings 1741, 030001 (2016).
- [4] S. Adachi et al., Properties of Semiconductors Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors (Wiley, New York, 2009).
- [5] T. Ganbold et al., Fast, multi-wavelength, efficiency-enhanced pixelated devices based on InGaAs/InAlAs quantum wells, J. Inst., 10, C03009 (2015).
- [6] T. Ganbold et al., Photon-sensitive multi-wavelength photon detectors based on epitaxial InGaAs/InAlAs quantum wells, J. Cryst. Growth 425, 341-345 (2015).
- [7] T. Ganbold et al., Position sensitive photon detectors using epitaxial InGaAs/InAlAs quantum wells, J. Inst., 9, C12043 (2014).
- [8] F. Capotondi et al., Two-dimensional electron gas formation in undoped in In<sub>0.75</sub>Ga<sub>0.25</sub>As/In<sub>0.75</sub>Al<sub>0.25</sub>As quantum wells, J. Vac. Sci. Technol. B 22, 702 (2004).
- [9] O. Oyun-Erdene et al., Quantum states of InGaAs/InAlAs quantum well detector for board-range photon detection, Mongolian J. Phys., Issue 4, 31-35 (2018).
- [10] F. Capotondi et al., Strain induced effects on the transport properties of metamorphic InAlAs/InGaAs quantum wells, Thin Sol. Films, 484, 400-407 (2005).
- [11] G. Snider, 1D Poisson, <http://www.nd.edu./gsnider/>.