

Молибдений Дисульфидын Нимгэн Үед Атомын Хүчний Микроскопийн Тусламжтай Литографи Явуулах Аргачлал

Г.Мөнхсайхан^{1,*}, С. Палл², Л.Оттавиано²

¹Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

² Италийн Лаквилагийн Их Сургууль, Физик Химийн салбар

Энэхүү ажилд нанохэмжээст MoS₂-ийн гадаргууд литографи явуулах судалгааны үр дүнг үзүүлэв. Механик хуулалтын аргаар гарган авсан MoS₂-ийн “ширхэг”-ийн гадаргууд атомын хүчний микроскопийн зүүний тусламжтай литографи явуулж химийн идүүлэлтээр литографийн ул мөрийг цэвэрлэсэн болно. Литографи явагдсан мужид атомын хүчний микроскопийн хэмжилт явуулж литографийн дараа ширхэгийн үеийг хуулах боломжтойг харуулсан болно.

PACS numbers: 82.37.Gk, 81.16.Nd, 81.65.Cf

I. ОРШИЛ

Графенийг нээсэн цагаас хойш хоёр хэмжээст материалд суурилсан электроникийн төхөөрөмжийн судалгаа шинжилгээний ажлын цар хүрээ улам өргөжин тэлсээр байна [1]. Графенд хориотой бүсийн өргөн байдаггүй нь үндсэн цэнэг зөөгчдийн хөдлөцийг үлэмж хэмжээгээр нэмэгдүүлдэг ч (200000 см²В⁻¹с⁻¹) нөгөө талаас энэ материалыг электроникийн тоног төхөөрөмжид хэрэглэх хэрэглээг хязгаарладаг байна. Сүүлийн жилүүдэд графений хориотой бүсийн өргөнийг нэмэгдүүлэх чиглэлээр олон тооны ажил хийгдэж байгаагийн ихэнх нь дан үе гарган авах судалгаанд суурилсан болно. Атомын хүчний микроскопийн зүүгээр цахиур болон титаны гадаргад Анодын Хэсэгчилсэн Исэлдүүлэлт (АХИ) [2-4] явуулах арга нь графений “нанотууз” [5-6] гарган авах нанолитографийн хамгийн үр дүнтэй аргад тооцогддог. Ийм байдлаар графений хориотой бүсийн өргөнийг графен нанотуузын өргөний урвуутай тэнцүү хэмжээгээр нээх боломж бүрддэг [7-9]. Гэвч хориотой бүсийн өргөн нь графенд суурилсан төхөөрөмжийн “on/off” шилжүүлгэд хэт бага байдаг. Дээрх асуудлыг шийдэх зорилгоор дэлхийн маш олон судалгааны багууд шинэ хоёр хэмжээст хагас дамжуулагч материалын судалгааг хийж эхэлсэн байна.

Молибденит буюу MoS₂ нь ван-дер-ваальсын сул хүчээр холбогдсон (S-Mo-S) үеүдээс тогтдог тул балк молибденитээс дан үеийг хялбархан хуулах бололцоог бүрдүүлдэг. Үүний сацуу MoS₂ нь балк хэлбэртээ 1.2 эВ, дан үе хэлбэртээ 1.8 эВ хориотой бүсийн өргөнтэй байдаг нь хоёр хэмжээст материалд суурилсан наноэлектроникийн үйлдвэрлэлийн шаардлагад нийцэж байна.

MoS₂ ирмэгийн механик болон дамжуулах онцгой шинж чанаруудыг харуулсан олон тооны судалгааны ажлууд хийгдсэн [10-11] бөгөөд “хуурмаг ирмэг”-ийг (механик хуулалтын аргаар гаргахад нэн төвөгтэй) гарган авах судалгаа нь хоёр хэмжээст материалд суурилсан нанотөхөөрөмжид нэн чухал болох нь нэгэнт тодорхой болсон билээ. Хосоки болон бусад судлаачид MoS₂ гадаргууд литографи явуулах боломжтойг [12] харуулсан хэдий ч энэ процесс нь өндөр вакуум нөхцөлд туннелийн микроскоп доор явагддаг юм. Одоогийн байдлаар MoS₂-ийн гадаргуугийн нанолитографийг агаарт явуулсан туршилтууд хийгдээгүй байсан бөгөөд энэхүү судалгааны ажилд атомын хүчний микроскопийн зүүгээр агаарт молибденитийн цөөн үеийн гадаргууд нанолитографи явуулах шинэ аргачлалын талаар танилцуулж байна.

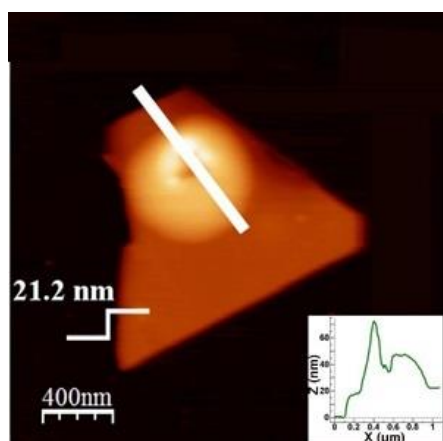
II. ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

Өндөр цэвэршилт бүхий MoS₂ кристаллыг механик хуулалтын аргаар скоч тууз ашиглан хуулж нимгэн үеүдийг гаргадаг. Хуулсан нимгэн үеийг 0.01 Ом · см хувийн эсэргүүцэлтэй цахиур суурь дээр буулгана. Тунадасжсан MoS₂-ийн ширхэгийн бүтцийг атомын хүчний микроскопийн (AFM Digital D5000, Veeco) тусламжтай судалсан бөгөөд уг микроскопийн контактын горимд литографийн процессийг явуулсан болно. Энэхүү литографийн процесс нь анодын хэсэгчилсэн идүүлэлтийн аргатай төстэй байсан. Атомын хүчний микроскопийн цахилгаан дамжуулагч зүүнд (зүүний хувийн эсэргүүцэл 0.01 – 0.025 Ом · см, антимолийн n-төрлийн холцтой цахиур материалтай, зүүний радиус ойролцоогоор 10 нм) сөрөг хүчдэл өгч (-6 В -оос -12 В), цахиур суурийг газардуулна. Микроскопийн зүүг MoS₂-ийн гадаргаас 10 нм өндөрт байрлуулж литографийн процессийг

* Electronic address: munerd@yahoo.com

агаарт (харьцангуй чийгшил 50% орчим, температур 20°C орчим) явуулахад зүүний үзүүр болон дээжний хооронд усны менискус үүсдэг. Хүчдлийн нөлөөгөөр усны H^+ ионууд дамжуулагч зүүнд, OH^- ионууд MoS_2 гадаргууд наалдана. Улмаар зүү автомат системийн тусламжтай литографи явуулах хэсэгт скан хийдэг. Литографийн процессийг амжилттай явуулахын тулд зүүний шилжих хурд, зүүний гадаргаас дээш байрлах өндөр, зүү болон дээжний хооронд өгөгдөх хүчдлийн утга болон орчны харьцангуй чийгшил гэсэн үндсэн дөрвөн параметруудийг тохируулдаг. Эдгээр параметруудийг зөв сонгосноор литографи нарийвчлал сайтай явагддаг.

Зураг 1-д литографи явуулсан үр дүнг үзүүлжээ. Литографийн процессийн дараа дээжийг 0.1 М HCl усан уусмалаар зайлах байдлаар литографийн ул мөрийг цэвэрлэдэг.



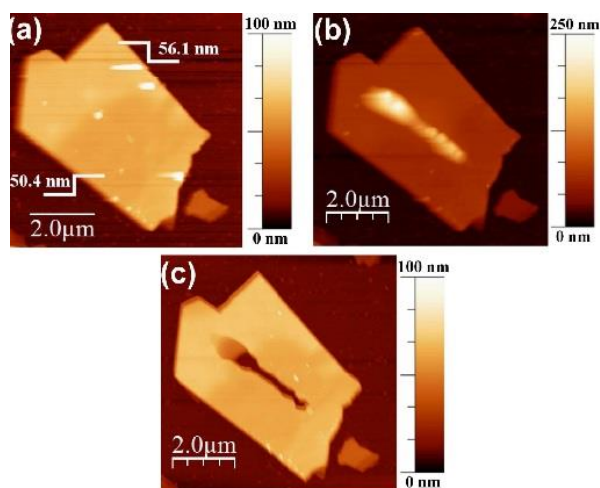
Зураг 1. Литографи явагдсан MoS_2 ширхэгийн атомын хүчний микроскопийн зураг. Литографид орсон мужийн өндөр болон хэлбрийг доод буланд харуулав.

Ш. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Зураг 1-д MoS_2 ширхэгийн атомын хүчний микроскопийн шинжилгээний дүнг үзүүлэв. Зураг дээрх цайвар мужид литографид орсон бүтцийн зураглалыг харуулсан байна. Молибденитийн ширхэгт литограф хийхийн тулд дээж болон микроскопийн зүүний хооронд -12 В хүчдэл олгосон ба дээжийг цагаан шугамын дагуу 0.1 мкм/с хурдтайгаар шинжилсэн байна. Литографид орсон хэсгийн 70 нм орчим жигд бус өндөртэй байсан болно. Хэмжилтээр дээжний зузаан (литографид ороогүй хэсгийн зузаан) 21.2 нм буюу 30 MoS_2 үетэй болох нь тогтоогдсон байна.

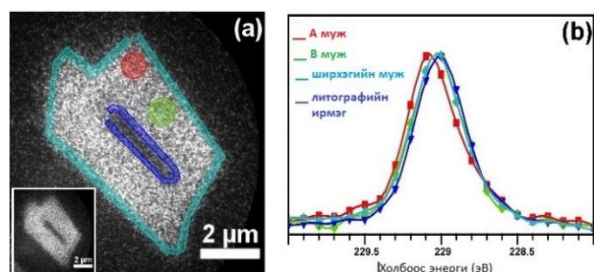
Зураг 2-т цахиур суурин дээр буулгасан молибденит (Зураг 2а), литографи явуулсан болон химийн идүүлэлт хийсний дараахь молибденитын ширхэгийн (Зураг 2с) атомын хүчний микроскопийн судалгааны үр дүнг үзүүлэв. MoS_2 -ийн ширхэг дээр литографийн

процессийг нарийвчлал сайтай явуулах үүднээс дамжуулагч зүүний үзүүрт $V=-10V$ хүчдэл олгож, зүүг 0.1 мкм/с хурдтай шилжүүлсэн бөгөөд 550 нм-ээс 900 нм мужид 160 нм орчим өндөртэй OH^- үе гаргасан. Литографийн процессийн төгсгөлд дээжинд 0.1М HCl усан уусмалаар 20 секунд туршид идүүлэлт хийж литографийн мужийг цэвэрлэж нүх үүсгэсэн (Зураг 2с). Туршилтын үр дүнгээс үзвэл литографид орсон нүх нь сууриндаа хүртэл бүрэн хуулагдаагүй буюу MoS_2 ширхэгийн зөвхөн дээд хэсэг нь хуулагдсан байна (Зураг 2с дээр үзүүлсэн нүх нь сууриндаа тултал идэгдээгүй байна).



Зураг 2. (а) Литографи хийхийн өмнөх MoS_2 ширхэг. (b) Литографи хийсний дараахь MoS_2 ширхэг ($V_{зүү} = -10V$, $v_{зүү} = 0.1$ мкм/с). (с) 0.1М HCl уусмалаар идүүлсний дараахь бүтэц.

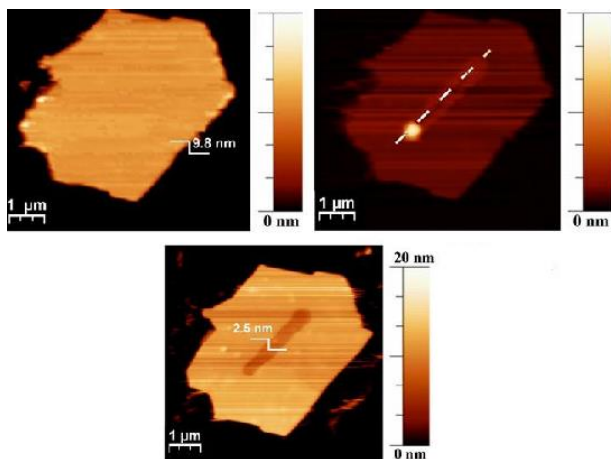
Литографид орсон болон идүүлэлт хийгдсэн дээжний электрон бүтцийг фотоэмиссийн спектроскопийн судалгаагаар шинжилсэн болно. Зураг 3а-д өмнө нь үзүүлсэн ширхэгийн наноспектроскопийн зураглалыг үзүүлэв. Шинжилгээг MoS_2 бүтцийн молибдений 3d5/2 төлөвт харгалзах холбоос энергийн утга болон 229.1 эВ-д явуулсан бөгөөд фотоны тусгалын энергийг 350 эВ байхаар сонгосон. Фотоэмиссийн спектроскопийн судалгааг молибденитийн бүтцийн дөрвөн өөр байрлалд явуулсан бөгөөд нормчлогдсон спектруудийг өнгөөр ялгаж үзүүлсэн болно (зураг 3б). Зургаас үзвэл спектруудийн хэлбрийн хувьд онцгой ялгаа илрээгүй ч холбоос энергийн утга бага зэрэг зөрүүтэйгээр тодорхойлогдсон байна. Спектроскопийн судалгаанаас үзвэл ногооноор тэмдэглэсэн мужид спектрийн муруй 30 мэВ, литографийн хуурмаг ирмэг дээр хийсэн спектрийн муруй нь 50 мэВ хэмжээгээр шилжсэн байна.



Зураг 3. (a) Молибденитийн ширхэгийн нано спектроскопийн зураглал. Холбоос энергийн 229.1 эВ-т бүртгэгдсэн зураг (туссан фотоны энерги 350 эВ). (b) Дөрвөн өөр байрлалд хэмжигдсэн нормчлогдсон спектрний зураглал.

Энэхүү шилжилт нь MoS_2 ширхэгт үүссэн хүхрийн атомуудын вакансийн ул мөртэй холбоотой талаар зарим судалгааны ажлуудад харуулсан байдаг [13-14]. Үүний зэрэгцээ ногооноор тэмдэглэсэн байрлал буюу “бодит” ирмэг дээрх өөрчлөлт нь нанолитографийн техникийн улмаас гадаргууд гажиг үүсдэг болохыг харуулж байна. Энэ гажгийн улмаас молибденитийн ширхэгийн зарим үеүд хуурч байгааг дараачийн ажлын үр дүнгээс харж болно.

Зураг 4-т 9.8 нм зузаантай дээжинд хийсэн литографийн судалгааны үр дүнг үзүүлсэн болно. Энэ дээжинд литографи явуулах үед микроскопийн зүүний хурдыг зөв тохируулсанаар жигд бөгөөд нарийн зурвас гаргах боломжтой нь харагдсан бөгөөд зүүний хурд 1 мкм/с байхад 3 нм орчим өргөнтэй хуурмаг ирмэгийг гарган авсан байна. Үүний сацуу MoS_2 ширхэгийн зузаан 1.4 нм хэмжээгээр нимгэрсэн бөгөөд энэ нь өмнө дурдагдсан наноспектроскопийн үр дүнг баталж байна.



Зураг 4. Зүүнээс баруун тийш: өөрчлөлт ороогүй MoS_2 ширхэг; литографийн процессийн дараахь MoS_2 ширхэг (цагаан зураасаар литографи явуулсан замыг үзүүлэв); HCl уусмалаар идүүлэл хийсний дараахь MoS_2 . Зүүний хүчдэл -8 В; зүүний хурд $= 0.1$ мкм/с. Идүүлэлтийн параметрууд: 0.05 М HCl уусмалд 10 с. Химийн идүүлэлтийн дараа бүтцэд нүх үүссэн.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажилд нанометрийн түвшинд MoS_2 ширхэгүүдэд литографи хийх шинэ аргачлалыг үзүүлсэн болно. Энэ аргачлал нь атомын хүчний микроскопийн хэмжилтээр баталгааждаг байна. Туршилтын төхөөрөмж нь хэсэгчилсэн анодын исэлдүүлэлтийн аргатай төсөөтэй боловч вакуум орчин шаарддаггүй онцлогтой. Хэмжилтийн үр дүнгээс үзвэл ОН-ионууд нь молибденитийн гадаргуугаас хүхрийн атомуудыг “бөмбөгдөж” байж болзошгүй байна. Энэ технологийг ашиглан MoS_2 -ийн цөөн үеийн “хиймэл” ирмэгийг гаргах боломжтой нь харагдсан болно. Энэ аргачлалаар MoS_2 ширхэгийг дахин хуулах боломжтой нь харагдсан.

V. НОМ ЗҮЙ

- [1] K.S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T.J. Booth, V.V. Khotkevich, S.V. Morozov and A.K. Geim, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2005, 102, 10451.
- [2] R.V. Martínez, J. Martínez and R. Garcia, Nanotechnology, 2010, 21, 245301.
- [3] P. Avouris, T. Hertel and R. Martel, Appl. Phys. Lett., 1997, 71, 285.
- [4] R. García, M. Calleja and F. Pérez-Murano, Appl. Phys. Lett., 1998, 72, 2295.
- [5] S. Masubuchi, M. Ono, K. Yoshida, K. Hirakawa and T. Machida, Appl. Phys. Lett., 2009, 94, 082107.
- [6] V. Barone, O. Hod and G.E. Scuseria, Nano Lett., 2006, 6, 2748.
- [7] Y.-W. Son, M.L. Cohen, S.G. Louie, Phys. Rev. Lett., 2006, 97, 216803.
- [8] J. Jung, T. Pereg-Barnea and A.H. MacDonald, Phys. Rev. Lett., 2009, 102, 227205.
- [9] M.V. Bollinger, J.V. Lauritsen, K.W. Jacobsen, J.K. Nørskov, S. Helveg and F. Besenbacher, Phys. Rev. Lett., 2001, 87, 196803.
- [10] T.F. Jaramillo, K.P. Jørgensen, J. Bonde, J.H. Nielsen, S. Horch and I. Chorkendorff, Science, 2007, 317, 100.
- [11] J.V. Lauritsen, M. Nyberg, R.T. Vang, M.V. Bollinger, B.S. Clausen, H. Topsøe, K.W. Jacobsen, E. Lægsgaard and J.K. Nørskov, F. Besenbacher, Nanotechnology, 2003, 14, 385.
- [12] S. Hosoki, S. Hosaka and T. Hasegawa, Appl. Surf. Sci., 1992, 60-61, 643.
- [13] M. Donarelli, F. Bisti, F. Perrozzi and L. Ottaviano, Chem. Phys. Lett., 2013, 588, 198.
- [14] S.K. Mahatha and K.S.R. Menon, J. Phys.: Condens. Matt., 2012, 24, 305502.