

IR Фотодетекторын Опто-Цахилгаан Характеристикийн Сайжруулалт

Хүрэлбаатар Загарзүсэм¹, Чой-Чилжон²

Хураангуй— Германи p-i-n фотодетекторуудыг графинтай болон графингүйгээр лабораторийн нөхцөлд хийж, тэдгээрийг хооронд нь харьцуулан графин давхарга хэрхэн фотодетекторын опто-цахилгаан параметрт нөлөөлж байгааг тодорхойлсон. Ингэхдээ фотодетекторыг харанхуй болон хэт улаан гэрлийн 1530-1630 нм долгионы цард характеристикаудыг нь хэмжсэн. Өрөөний температурт 250 мкм диаметр гэрэл мэдрэх талбай бүхий фотодетекторын харанхуйн гүйдэл нь графингүй фотодетектороос мэдэгдэхүйц багассан нь графин давхарга германи гадаргыг итвэхгүйжүүлж, ойлтын эсрэг үйлчлэл үзүүлж гэрлийн хүлээн авалтыг сайжруулсан. Энэ үр дүнг онол болон хэмжилтийн үр дүнгээр тайлбарлаж германийн гадарга дээр графиныг жигд суулгавал фотодетекторын опто-цахилгаан характеристикиг сайжруулах боломжтойг тогтоосон.

I. УДИРТГАЛ

Хэт улаан (IR) гэрлийн тухайлбал 1300 нм ~ 1600 нм долгионы урт бүхий фотодетекторыг цахиур (Si) дээр хийх нь бүгдийг нэг цахиур дээр нэгтгэсэн шинэ оптоэлектроник системийг хэрэгжүүлэх чухал алхам юм. Энэ шинэ систем нь гэрлийн үүсгүүр, модулятор, долгион хөтлүүр, фотодетектор зэргээс тогтох бөгөөд ингэснээр их хэмжээний дохио боловсруулах, маш өргөн зурвас бүхий электроникийн систем болох юм [1]. Үүнээс гадна мэдрэх чадвар сайтай хэт улаан гэрлийн фотодетектор нь олон практик хэрэглээтэй бөгөөд оптик холбоо, цэрэг, иргэн, үйлдвэрлэл, бай тодорхойлох, электроникийн систем зэргийн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг юм [2]. Өндөр үзүүлэлттэй фотодетекторыг хийхэд түүнийг хийх материал болон төхөөрөмжийн хийцийн аль алийг нь анхаарах хэрэгтэй. Өнөөг хүртэл IR фотодетекторт янз бүрийн гэрэл мэдрэх материал болон төхөөрөмжийн хийцүүд туршигдаж ирсэн. Сүүлийн үеийн судалгаагаар фотодамжуулагч [3], p-i-n фотодиод [4], Шотки фотодиод [5], метал-хагас дамжуулагч-метал [6] фотодетекторууд германи (Ge)-ийг IR гэрлийн детекторт хамгийн ирээдүйтэй материал гэдэг нь нотлогдож байна. Энэ нь Ge-ийн 1200 нм ~1600 нм IR долгионы цард өндөр шингээлттэй байдагтай холбоотой юм.

Мөн төрөл бүрийн фотодетекторын хийцүүд дотроос өндөр мэдрэмж, өндөр хурд, бага шуугиантай учраас оптик холбоонд хамгийн өргөн ашиглагддаг фотодетектор нь p-i-n бүтэцтэй фотодиод юм. Энэ нь хомсдолын мужийн зузаан буюу үндсэн хольцгүй давхаргын зузаанаар нь оптик шинж чанарыг нь тохируулж болдогтой холбоотой [7]. Ge p-i-n фотодетекторыг Si дээр ургуулахад үндсэн хүндрэл нь Ge болон Si-ийн талст торуудын хоорондох ялгаатай байдал юм. Энэ нь гадаргын жигд биш байдал болон интерфейс орчмын гажиг үүсгэдэг ба фотодетекторын ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлдөг. Өөр нэг хүндрэл нь тогтворгүй Ge оксид ба түүнтэй холбоотой өндөр харанхуйн гүйдэл юм.

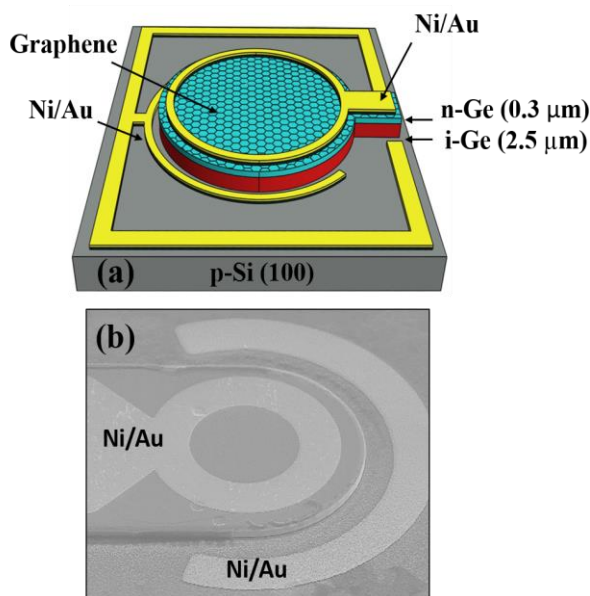
Ge фотодетекторын харанхуйн гүйдлийг багасгахдаа Ge оксидыг итвэхгүйжүүлэх ба хольцын атомыг оруулах техник [8] байдагч мш бага харанхуйн гүйдэлтэй болгож байсан ч Ge-ийн гадаргын бүтцээс их хамаарч байсан байна. Мөн, бид өмнөх судалгаагаараа графин Ge-ийн финнийн эффектгийг багасгаж, Ge-ийн гадаргыг итвэхгүйжүүлж байгааг туршилтаар тогтоосон [9]. Саяханаас графиныг дэлгэц [10], гэрлэн диод [11], нарны цахилгаан үүсгүүр [12], фотодетектор [13] зэрэг оптоэлектроник төхөөрөмжүүдэд ашиглах судалгаа, хөгжүүлэлтийн ажил эрчимтэй хийгдэж байна. Эдгээрт графину өндөр гэрэл нэвтрүүлэх чадвар, цахилгаан дамжууламжын судалгаа олон хэвлэгдсэн ч графинуыг электрон төхөөрөмж дээр суулган түүний гэрэл нэвтрүүлэх дамжууллын судалгаа тийм ч хангалттай биш байна. Энэ нь их талбай бүхий гадарга дээр графинуыг жигд суулгахад хүндрэлтэй байдагтай холбоотой юм.

Энэ судалгааны ажлын зорилго нь Ge p-i-n фотодетекторын опто-цахилгаан характеристикт графин нимгэн давхарга хэрхэн нөлөөлж байгааг тогтоох юм. Энэ зорилгоор бид фотодетекторуудын гэрэл мэдрэх талбайг графинтэй болон графингүйгээр лабораторийн нөхцөлд хийсэн. Судалгааны үр дүнд графин гэрэл шингээх, цахилгаан дамжуулал зэргийг нэмэгдүүлж төхөөрөмжийн ажиллагааг сайжруулж байгаа нь тогтоогдсон. Бидний мэдэж байгаагаар Ge p-i-n In our knowledge, no one has reported a graphene incorporate Ge p-i-n heterojunction photodetector.

II. ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

Фосфорын хольцтой n-Ge болон хольцгүй i-Ge эпитаксиал давхаргыг p-төрлийн 5-15 Ω -см эсэргүүцэлтэй Si (100) субстрат дээр температурын огцом өөрчлөлттэй уураар тунадасжуулах аргаар ургуулсан. Ge-ийг ургуулахын өмнө Si субстратыг

¹Х.Загарзүсэм, Багш, Мэдээлэл, Холбооны Технологийн Сургууль, Монгол Улсын Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Улаанбаатар, МУ (Утас: 7015-5333; Э-мэйл: zagarzusem@must.edu.mn) ²Чой-Чилжон, Профессор, Хагас дамжуулагчийн физикийн судалгааны төв, Чонбүкийн Үндэсний Их Сургууль, Жонжу, БНСУ



Зураг 1. а. Графин-Ge p-i-n фотодетекторын бүтэц

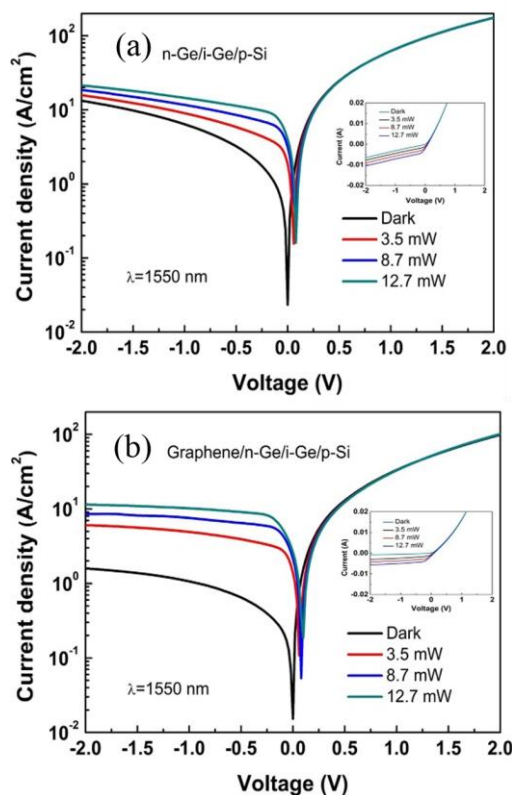
$H_2O_2+H_2SO_4$ (1:2) уусмалд цэвэрлээд ионжуулсан усаар зайлсан. Байгалийн оксидыг шингэрүүлсэн фторт устөрөгчийн (HF) хүчилд 15 сек дүрж идүүлээд азотын хийгээр үлээж хатаасан. Тэгээд 20 торр даралтын дор $350\text{ }^\circ\text{C}$ температурт 110 нм зузаан эхний буфер Ge давхаргыг ургуулсан. Ингэхдээ герман (GeH_4) үүсгүүр хий болгон 30 стандарт куб сантиметр/мин, зөөгч хий болгож устөрөгчийн (H_2) 20 стандарт литр/мин хийтэй хольж ургуулсан. Үүний дараа $500\text{ }^\circ\text{C}$ температурт i-Ge давхаргыг 2.5 мкм зузаантайгаар адилхан хийн орчинд ургуулсан. Төгсгөлд нь фосфорын хольцтой n-төрлийн ~ 0.3 мкм зузаан Ge давхаргыг $500\text{ }^\circ\text{C}$ температурт 100 ppm фосфиныг (PH_3) хольцын үүсгүүр байдлаар ашиглан ургуулсан. n-Ge давхаргын зөөгчийн концентрацыг $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ гэж хэмжилтээр тогтоосон. Мөн нийт эпитаксиал Ge давхаргын нийт зузааныг 2.9 мкм гэж хэмжилтээр тогтоосон. Энэ туршилтын дэлгэрэнгүй мэдээллийг бидний өмнө хэвлэгдсэн өгүүллээс авч болно [14]. Графин бүхий фотодетекторыг хийхийн өмнө субстратыг эхлээд азетон, метанолаар цэвэрлээд графин суулгахын өмнө байгалийн оксидыг арилгахын тулд буфер оксид идүүлэгчид 20 сек дүрээд ионжуулсан усаар угаагаад азотын хийгээр үлээлгэж хатаасан.

Энэ судалгаанд ашигласан графиныг зэс (0.035 мм) нимгэн ялтас дээр химийн уураар тунадасжуулах аргаар ургуулсан. Ингэхдээ зэс бэлдцүүдийг вакуум хоолой руу хийсний дараа устөрөгчийн орчинд 45 минутын туршид $1050\text{ }^\circ\text{C}$ температурт халаасан. Энэ нь зэсийн том ширхгүүдийг болон хүчилтөрөгч бүхий гадаргыг багасгах бөгөөд устөрөгчийн даралт нь 67 торр, урсах хурд нь 5 стандарт куб сантиметр/мин байсан. Энэ процессын дараа графин ~ 200 торр даралт 20 стандарт куб сантиметр/мин метан (CH_4) 5 стандарт куб сантиметр/мин устөрөгчийн (H_2) хийн орчинд ургуулсан. Эцэст нь графин дээр нь ургасан зэс ялтас метангүй устөрөгчийн адилхан нөхцөлд хурдан

хөргөөсөн. Графиныг субстрат дээр суулгахын тулд зэс ялтас дээр ургасан графиныг поли метилметакрилатээр (PMMA)-оор спинкоэтерээр 50 сек 4200 эргэлт/мин хурдтай хучсан. Үүний дараа зэс ялтсыг аммонийн персульфатын $[(NH_4)_2S_2O_8]$ уусмалд уусгаад ард талдаа PMMA бүхий графиныг өмнө нь бэлдсэн субстрат дээрээ суулгаж өгсөн. Тэгээд тусгай нөхцөлд хатаасны дараа PMMA давхаргыг ацетон, изопропил алкахолд (IPA) уусгаснаар графин-Ge контакт хийгдсэн. Төхөөрөмжийн гэрэл мэдрэх талбайг стандарт фотолитограф болон реактив ион идүүлэгч ашиглан 250 мкм диаметртэй тойрог хэлбэртэйгээр Ge-ийг доод Si субстрат хүртэл идүүлсэн. Эцэст нь никель (Ni)/алт (Au) металлуудыг тус бүр 50 нм/150 нм зузаантайгаар электрон-цацрагт ууршуулагч ашиглан контакт хийж өгсөн. Төхөөрөмжийн хөндлөн бүтцийг Зур.1-д үзүүлсэн байна. Хийсэн төхөөрөмжүүдийн харанхуйн болон гэрэлтэй үеийн гүйдлийг Эликс (Elescs 401) анализор ашиглан өрөөний температурт хийсэн. IR гэрлийн хэмжилтийг TSL-210 хувьсах лазер ашиглан нэг горимын оптик кабель ашиглан фотодетекторын гэрэл мэдрэх талбайд тусгаж өгсөн.

III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Харанхуй болон 1550 нм долгионы уртад ялгаатай

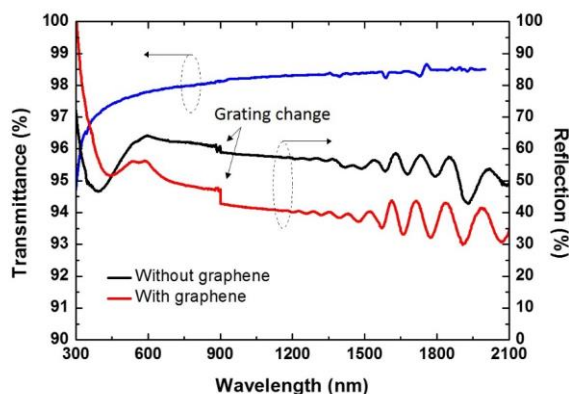


Зураг 2 а. Графингүй болон б. графинтай Ge p-i-n фотодетекторын харанхуй болон гэрэлтэй үеийн J-V муруй.

гэрлийн чадалтай гэрэлтэй үед хэмжсэн графинтай болон графингүй фотодетекторын ердийн гүйдлийн нягт хүчдийн (J-V) характеристикийг Зур.2 (а) болон Зур. 2 (б) зургуудад тус бүр үзүүлсэн байна. Зургаас хархад хэмжилийн муруй нь ердийн шулуутгагчийн

шинж чанарыг үзүүлсэн байна. Шууд холболттой буюу эерэг хүчдлээр үйлчилхэд p-i-n гарч эхлээд идеал диодны шинж чанар үзүүлж байснаа өндөр хүчдэлд их хэмжээний зөөгч болон цуваа эсэргүүцлийн нөлөөгөөр идеал байдлаасаа өөрчлөгдөж байна. Үүнээс гадна графинтай фотодетектор графингүй фотодетектороос бага харанхуйн гүйдэлтэй байна. Зур.2 –ийн дотор фотодетекторуудын харгалзах шугаман хэмжээст гүйдэл-хүчлийн характеристикуудыг үзүүлсэн байна.

-1В харанхуйн хүчдэлд харгалзах



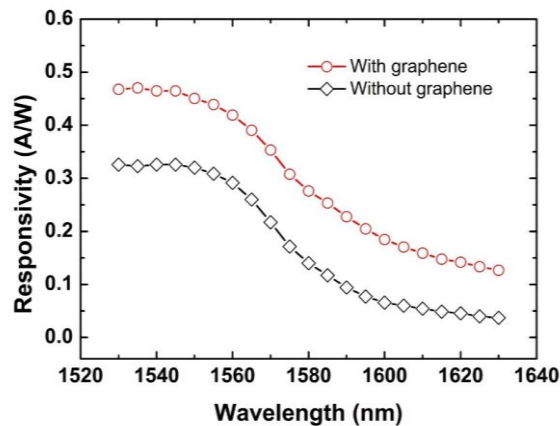
Зураг 3. Графины гэрэл нэвтрүүлэх чадвар ба графингүй болон графинтай Ge p-i-n фотодетекторын ойлтын хэмжилт

гүйдлийн нягт нь графинтай болон графингүй төхөөрөмжүүдийн хувьд 1.06 A/cm^2 , 6.39 A/cm^2 байсан. Графинтай төхөөрөмжийн харанхуйн гүйдлийн багасалт нь дараах шалтгаантай байж болно. Нэгдүгээрт цахилгаан дамжуулал өндөр графин гэрэл мэдрэх талбайг бүхэлд нь бүрхсэнээр дамжууллын талбай (метал) ихэссэн, хоёрдугаарт Ge гадарга графинаар итвэхгүйжсэн буюу графин Ge контактын саадын улмаас багаж болно. Бидний өмнөх

судалгаагаар метал-Ge контактын графинаар Ge-ийн гадаргыг итвэхжүүлсэнээс шалтгаалан интерфэйсийн төлвийн нягт багасч улмаар саадын өндөр нэмэгдэж байгаа нь тогтоогдсон. Графины гэрэл нэвтрүүлэх чадвар болон Ge p-i-n субстратын долгионы уртаас хамаарсан ойлтыг Зур.3-т үзүүлсэн байна. Гэрэл нэвтрүүлэх чанарыг нь хэмжихдээ графиньг крварц субстрат дээр суулгасан бөгөөд 400 нм ~ 200 нм долгионы уртад нэвтрүүлэх чадварын дундаж нь 98% байсан. Мөн Ge p-i-n субстратын графинтай болон графингүй үеийн ойлтын хэмжилтийг Зур.3-т үзүүлсэн байна.

Хэмжилтээс хархад графинтай Ge p-i-n субстрат маш сайн ойлтын эсрэг шинж чанарыг графингүй субстраттэй харьцуулахад үзүүлсэн. Ойлтын хэвийн бус ~ 900 нм орчим дахь шилжилт нь хэмжилтийн системийн онцлогоос болж үүссэн байна. Зур.4-д графинтай болон графингүй Ge p-i-n фотодетекторын 1530 нм ~ 1630 нм долгионы урт болон гэрлийн характеристикийн хамаарлыг харуулсан байна. Энэ хэмжилтийг өрөөний температурт 3.5 мВт чадалтай IR гэрэл, -1 В шилжүүлгийн хүчдэлтэй үед хэмжсэн. Хоёр фотодетекторын хувьд 1545 нм хүртэл долгионы уртад гэрлийн характеристик бараг адилхан тогтвортой байснаа буурсан байна. 1550 нм долгионы уртад

гэрлийн характеристик нь графингүй болон графингүй фотодетекторын хувьд тус бүр 0.45 А/Вт ба 0.32 А/Вт гэж тооцоологдсон. Үүнд харгалзаад гадаад квант үр ашиг нь графинтай болон графингүй фотодетекторт 0.36 and 0.25 гэж тооцоологдсон. Гэвч гэрлийн долгионы урт 1600 нм болж өсхөд хоёр фотодетекторын гэрлийн характеристик 0.18 А/Вт,



Зураг 4. Графингүй болон графинтай Ge p-i-n фотодетекторын гэрлийн характеристикийн

0.45 А/Вт болж тус тус буурсан байна. Энэ нь Ge-ийн шингээлтийн коэффициент энэ долгионы уртаас буурч байгаатай холбоотой.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэ судалгаагаар химийн уураар тунадасжуулах аргаар нүүрстөрөгчийн нэг атомын зузаан бүхий графин, p-Si (100) субстрат дээр n-Ge/i-Ge нимгэн давхаргыг тус тус амжилттай ургуулж чадсан. Бэлдсэн материалуудаа ашиглан графинтай графингүй Ge p-i-n фотодетекторуудыг лабораторийн нөхцөлд хийж тэдгээрийн опто-цахилгаан характеристикийг тодорхойлсон. Графин нь Ge-ийн гадаргыг итвэхжүүлэх буюу гэрлийн ойлтын эсрэг давхаргын үүрэг гүйцэтгэсэнээр фотодетекторын опто-цахилгаан характеристикийг сайжруулсан.

V. НОМ ЗҮЙ

- [1] [1] Z. Huang, N. Kong, and X. Guo, "21-GHz bandwidth germanium-on-silicon photodiode using thin SiGe buffer layers", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* vol.12, pp.1450-1454, March.2006.
- [2] R.Y. Shah, and Y.K. Agrawal, "Introduction to fiber optics: Sensors for biomedical applications", *Indian J Pharm Sci.* vol.73, pp. 17-22, Jan.2016.
- [3] L. Chen, and M. Lipson, "Ultra-low capacitance and high speed germanium photodetectors on silicon", *Opt. Express*, vol.10, pp. 7901-7906, Dec.2009.
- [4] M. Fujiwara, T. Hirao, M. Kawada, H. Shibai, S. Matsuura, H. Kaneda, M. Patrashin, and T. Nakagawa, "Development of a gallium-doped germanium far-infrared photoconductor direct hybrid two-dimensional array", *Appl. Opt.* vol. 42, pp.2166-2173, May.2003.
- [5] H.D. Yang, Y.H. Kil, J.H. Yang, S. Kang, T.S. Jeong, C.J. Choi, T.S. Kim, and K. H. Shim, "Fabrication of PIN photo-diode from

- p-Ge/i-Ge/n-Si hetero junction structure”, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol.17, pp.74-80, Sep.2014.
- [6] L.H. Zeng, M.Z. Wang, H. Hu, B. Nie, Y.Q. Yu, C.Y. Wu, L. Wang, J.G. Hu, C. Xie, F.X. Liang, and L.B. Luo, “Monolayer graphene/germanium Schottky junction as high-performance self-driven infrared light photodetector”, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* vol.5, pp. 9362-9366, Sep.2013.
- [7] R. Calarco, M. Fiordelisi, S. Lagomarsino, and F. Scarinci, “Near-infrared metal-semiconductor-metal photodetector integrated on silicon”, *Thin Solid Films*, vol.391, pp. 138-142, July.2001.
- [8] J. Wang, and S. Lee, “Ge-photodetectors for Si based optoelectronic integration”, *Sensors*, vol.11, pp. 696-718, Nov.2011.
- [9] M. Takenaka, K. Morii, M. Sugiyama, Y. Nakano, and S. Takagi, “Dark current reduction of Ge photodetector by GeO₂ surface passivation and gas-phase doping”, *Opt. Express*, vol.20, pp.8718, April.2012.
- [10] Z. Khurelbaatar, Y.H. Kil, H.J. Yun, K.H. Shim, J.T. Nam, K.S. Kim, S.K. Lee, and C.J. Choi, “Modification of Schottky barrier properties of Au/n-type Ge Schottky barrier diode using monolayer graphene interlayer”, *J. Alloy. Compd.*, vol.614, pp.323-329, April.2014.
- [11] P. Blake, P. D. Brimicombe, R. R. Nair, T. J. Booth, D. Jiang, F. Schedin, L. A. Ponomarenko, S. V. Morozov, H. F. Gleeson, E. W. Hill, A. K. Geim, and K. S. Novoselov, “Graphene-based liquid crystal device”, *Nano Lett*, vol.8, pp.1704, April.2008.
- [12] G. Jo, M. Choe, C.-Y. Cho, J. H. Kim, W. Park, S. Lee, W.-K. Hong, T.W. Kim, S.-J. Park, B. H. Hong, Y. H. Kahng, and T. Lee, “Large-scale patterned multi-layer graphene films as transparent”, *Nanotechnology*, vol.21, pp.175201-175702, April.2010.
- [13] L. Gomez De Arco, Y. Zhang, C. W. Schlenker, K. Ryu, M. E. Thompson, and C. Zhou, “[Continuous, highly flexible, and transparent graphene films by chemical vapor deposition for organic photovoltaics](#)”, *ACS Nano*, vol.4, pp.2865-2873, April.2010.
- [14] X. An, F. Liu, Y.J. Jung, and S. Kar, “Tunable graphene-silicon heterojunction for ultrasensitive photodetection”, *Nano Lett*, vol.13, pp. 909-916, Feb.2013.