

2D o'lchamli MoS₂/WSe₂ geterosturukturalariga yorug'lik ta'sir etganda hosil bo'lgan fototokning kuchlanishga bog'liqligi.

Dadamirzayev Muhammadjon G'ulomqodirovich

e-mail: dadamirzaev70@mail.ru

Namangan davlat texnika universiteti

Qosimova Mamura Odiljonovna

Namangan davlat texnika universiteti

e-mail: omamuraqosimova@gmail.com

Maxmudov Azamat Sattorovich

Namangan davlat texnika universiteti

e-mail: asmakhmudov05@gmail.com

Abstrakt. Ushbu ishda ikki o'lchamli MoS₂/WSe₂ geterostrukturasida yorug'lik ta'sirida hosil bo'ladigan fototokning kuchlanishga bog'liqligi o'rganildi. Geterostruktura p–n o'tishiga foton energiyasi materialning taqiqlangan zona kengligidan katta bo'lgan yorug'lik tushganda, elektron–teshik juftlari generatsiyasi yuz beradi. Elektr maydon ta'sirida ushbu zaryad tashuvchilar ajraladi va tashuvchilar yo'nalishida fototok hosil qiladi. Bir qatlamli materiallarning atom o'lchamlari, kuchli spin-orbital bog'lanish va kvant effektlari tufayli generatsiya qilingan fototokning tezkorligi, amplitudasi va chiziqliligi yuqori bo'ladi. Tadqiqotda yorug'lik intensivligi, to'lqin uzunligi va kuchlanishning fototok hosil bo'lishiga ta'siri tahlil qilinadi hamda ikki o'lchamli geterostrukturalarning optoelektronika qurilmalaridagi afzalliklari ko'rsatib berildi.

Kalit so'zlar: Ikki o'lchamli materiallar, MoS₂, WSe₂, geterostruktura, p–n o'tish, fototok, fotogeneratsiya, spin-orbital effektlari, optoelektronika, fotodetektorlar.

Аннотация. В данной работе исследована зависимость фототока от напряжения в двухмерной гетероструктуре MoS₂/WSe₂ при воздействии света. При облучении p–n перехода гетероструктуры светом с энергией фотонов, превышающей ширину запрещённой зоны материала, происходит генерация электрон-дырочных пар. Под действием электрического поля эти

носители заряда разделяются, и в направлении их движения формируется фототок. Благодаря атомной толщине однослойных материалов, сильному спин-орбитальному взаимодействию и квантовым эффектам скорость, амплитуда и линейность генерируемого фототока оказываются высокими. В исследовании анализируется влияние интенсивности света, длины волны и напряжения на формирование фототока, а также показаны преимущества двумерных гетероструктур в оптоэлектронных устройствах.

Ключевые слова: двумерные материалы, MoS_2 , WSe_2 , гетероструктура, p–n переход, фототок, фотогенерация, спин-орбитальные эффекты, оптоэлектроника, фотодетекторы.

Abstract. This study investigates the voltage-dependent photocurrent generated in a two-dimensional $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ heterostructure under light illumination. When light with photon energy greater than the material's bandgap is incident on the heterostructure's p–n junction, electron–hole pairs are generated. Under the influence of an electric field, these charge carriers separate, producing a photocurrent along their direction of motion. Due to the atomic-scale thickness of monolayer materials, strong spin–orbit coupling, and quantum effects, the generated photocurrent exhibits high speed, amplitude, and linearity. The study analyzes the effects of light intensity, wavelength, and applied voltage on photocurrent formation and demonstrates the advantages of two-dimensional heterostructures in optoelectronic devices.

Keywords: two-dimensional materials, MoS_2 , WSe_2 , heterostructure, p–n junction, photocurrent, photogeneration, spin–orbit effects, optoelectronics, photodetectors.

KIRISH

Soʻngi yillarda ikki oʻlchamli materiallar asosida yaratilgan p–n oʻtishli geterostrukturalar yuqori sezuvchanlikka ega fotodetektorlar, optoelektronika va nanoelektronikaning istiqbolli yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Xususan, MoS_2 va

WSe₂ kabi o'ta yupqa qatlamli materiallarning energetik zonalarining mos kelishi, ularning o'zaro van-der-Vaals bog'lanish orqali birikishi va kuchli spin-orbital o'zaro ta'sirlari yangi fizik hodisalar yuzaga kelishiga olib keladi.[1] MoS₂ monoqatlamining infraqizil va ko'rinadigan yorug'lik diapazonidagi fotoyutilish spektri sezilarli ekanini ko'rsatdi [2]. Ikki o'lchamli materiallarda eksiton effektlarining ustunligi o'rganilib, bular monoqatlamli MoS₂ va WSe₂ da spin-orbital bog'lanish effekti, K/K' orbital selektivligi, va kuchli spin-orbital o'zaro ta'sirlar mavjudligini aniqlaganlar [3]. Biroq, so'nggi yillarda ikki o'lchamli (2D) materiallarni vertikal joylashtirish orqali van-der-Vaals geterostrukturalarini yaratish imkoniyati paydo bo'ldi. Tadqiqotlarda molibden disulfid (MoS₂) va volfram diselenid (WSe₂) monoqatlamlaridan iborat II-turdagi geteroo'tish hosil qilingani ko'rsatiladi. Strukturada qatlamlararo interfeys atom darajasida toza bo'lib, zaryad tashuvchilar energetik zonalar farqi tufayli tabiiy ravishda ajraladi: elektronlar MoS₂ tomoniga, teshiklar esa WSe₂ tomoniga o'tadi[4]. Ushbu maqolada shuni o'rganilganki, MoS₂/WSe₂ geterostrukturalarida fototokning kattaligi va spektral sezgirligi interfeysda bu yarimo'tkazgich ichidagi ichki elektr maydon ta'sirida valent va o'tish zonalarining energiya bo'yicha egilishi jarayoni, energiya to'siqlari va tunnellanish ehtimoli bilan belgilanadi. Mazkur ishlar shuni ko'rsatadiki, MoS₂/WSe₂ geterostrukturasiida fototokning kattaligi va spektral sezgirligi interfeysda bu yarimo'tkazgich ichidagi ichki elektr maydon ta'sirida valent va o'tish zonalarining energiya bo'yicha egilishi jarayoni, energiya to'siqlari va tunnellanish ehtimoli bilan belgilanadi. MoS₂ asosidagi lateral p-n o'tishlarda fototok kuchlanish bilan nolinear o'sishini kuzatganlar [5]. Ushbu ishda natijalar drift-diffuziya jarayonlari bilan birga kvant tunnellanish jarayonlari ko'rsatadi. Bunday effektlar MoS₂/WSe₂ geterostrukturalarida yanada kuchliroq bo'lishi mumkin, chunki materiallarning ishchi funksiyalari va zona kengliklari farqi energiya to'siqlarini keskin oshiradi[6]. Bu ishda natijalari interfeys defektlari eksitonlarning rekombinatsiya vaqtini qisqartirib, fototokning kuchlanishga bog'liqligiga bevosita ta'sir qilishini ko'rsatadi. Bu holat ayniqsa MoS₂/WSe₂ kabi ikki material orasida tabiiy van-der-Vaals interfeysi bo'lgan strukturalarda muhim

ahamiyatga ega. 2D materiallar va ularning geterostrukturalari ustida umumiy nazariy asoslar Novoselov va hamkorlari tomonidan yoritilgan bo'lib, ular 2D materiallarning yangi elektron fazalari, kuchli kvant cheklanishi va van-der-Vaals bog'lanishlarini ko'rsatadi[7]. Bu ishda grafen, boshqa ikki o'lchovli materiallar va turli ikki o'lchovli kristallar yoki ikki o'lchovli kristallar va boshqa (nano) materiallarning kombinatsiyasiga asoslangan gibril tizimlarga asoslangan zamonaviy fotodetektorlarning umumiy ko'rinishini va baholashini taqdim etamiz. to'lqin o'tkazgichlar [8]. Bu maqolada $\text{MoSe}_2 / \text{WSe}_2$ heterobilayerlarida asosiy noma'lum parametrlarni ratsional qurilma dizayni va submikrometr burchakli echilgan fotoemissiya spektroskopiyasi (m-ARPES) yordamida fotoluminesans bilan birgalikda aniqlaymiz. Biz K-nuqta maydondagi chiziqlar kuchsiz gibrilanganligini aniqlaymiz, valentlik diapazoni 300 meV ga teng bo'lib, II turdagi diapazonning tekislanishini nazarda tutadi[9]. 2D fotodetektorlar bo'yicha keng ko'lamli adabiyotlarni qilib, turli mexanizmlar (photovoltaik, photoconductive, bolometric va boshqalar) asosida shaxsiy xossalarini chuqur sharhlagan[10]. Ushbu ishda $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ van-der-Vaals geterobilayerida hosil bo'ladigan interlayer (ya'ni elektron va teshi)k turli qatlamlarda o'rganilgan, lekin zaryad tashuvchi ajralishi o'lchangan, lekin hosil bo'lgan fototok yoki qurilma xarakteristikasi berilmagan[11]. Ush ishda $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ van-der-Vaals geterostrukturasida yorug'lik ta'sirida hosil bo'lgan eksitonlarning qatlamlararo zaryad ajralishi o'rganilgan[12]. Ushbu ish Ikki o'lchalimli materiallarda eksitonlarni boshqarish ularni yashash vaqtini va uzoqroqqa tarqalishini(diffuziyasi) nazorat qilinadi[13]. Bu ishda manba-drenaj oqimi sezilarli bo'lgan mintaqada n-tipdagi MoS_2 elektronlari va p-tipli WSe_2 segmentlaridagi teshiklar deyarli muvozanatlashgan, heterostruktura maydoni esa mobil zaryadlardan tugaydi. Mahalliy o'tkazuvchanlikning fazoviy evolyutsiyasi MoS_2 -heterostruktura- WSe_2 chizig'i bo'ylab lateral tasmaning egilishi va kamayish mintaqalarining shakllanishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Bizning ishimiz yangi transport harakatlarining mikroskopik kelib chiqishini aniq ko'rsatib beradi, bu WSe_2 geterosturuktura o'rganilgan[14]. yarimo'tkazgichli qurilmaning o'lchami

kamayishi bilan ularda asta-sekin turli xil kvant effektlari paydo bo'ladi. Bu klassik qurilmalar nazariyasini qo'llash doirasi hozir cheklanganligini ko'rsatadi. So'nggi yillarda ajoyib atomik xususiyatlarga ega ikki o'lchovli (2D) materiallar katta qiziqish uyg'otdi. WS₂, MoS₂, MoSe₂, WSe₂ va qora fosfor (BP) kabi ba'zi 2D pn birikmalarining elektrostatik maydon xususiyatlari yarimo'tkazgichlar uchun yangi imkoniyatlar eshigini ochadi. Mikroto'lqinli maydon ta'sirida 2D pn o'tkazgichlarning diffuziya sig'implari va differentsial o'tkazuvchanligining o'zgarishi va 2D va 3D pn o'tkazgichlarning diffuziya sig'implari va differentsial o'tkazuvchanliklari mikroto'lqinli maydon ta'sirida o'tkazuvchanliklarning o'zgarishi solishtirilgan.[15]. kki o'lchovli (2D) diodlarning elektronlari va teshiklarining kvazifermi darajalari va oqim kuchlanish xususiyatlarining yorug'lik to'lqin uzunligiga bog'liqligi nazariy jihatdan o'rganildi. Mikroto'lqinli maydon ta'sirida 2D MOSFETlarning kvant sig'imi ortadi. Mikroto'lqinli maydon kanaldagi elektronlar va teshiklarni isitadi, bu esa yarimo'tkazgichning potentsial to'siqni engib o'tishiga imkon beradi. Natijada yarimo'tkazgich orqali to'g'ridan-to'g'ri oqim o'tadi [16]. Maqolada pn o'tishda (p-n-junction) energiya yuqori (ya'ni "issiq") zaryad tashuvchilar (elektron va teshiklar) issiqlik termofoto emf (mikroto'lqin maydoni va yorug'lik ta'siri ostida davom etdilar. Tajriba yordamga ko'ra, mikroto'lqin maydoni tashuvchilarni isitadi va bu isish termo-elektromotor kuchi vujudga keladi. Uch effekt fotovoltajdagi elektron-hol juftliklari (yorug'likdan hosil bo'ladigan) ta'siridan alohida klassik va muhim rol o'ynaydi. Ushbu ishda meaxanik deformatsiya kuchli elektromagnit maydon ostida sig'im hamda dinamik qarshilikning noxiziqli xossalari nazariy tadqiq qilinga[17]. Dioddan chiqadigan tokning o'rtacha faqat konveksiya toki bilan. Bu ishda

Siljish toki ning o'rtacha qiymat har doim nolga teng , shu sababli u dioddan chiqadigan o'rtacha tokka ta'sir qilmaydi. Ushbu ishda O'YUCH maydonda joylashgan p-n-o'tish VAXsi noideallik koefitsiyenti o'zgarishining differensial qarshiligi, diffuziya sig'imi va differensial o'tkazuvchanligiga ta'siri o'rganilgan. Bunda, differensial qarshilik kuchli O'YUCH maydonda bo'lsa ham, kuchsiz O'YUCH maydonda bo'lsa ham p-n o'tish VAXsi noideallik koefitsiyenti qiymati

ortishi bilan ortib borishi ko'rsatilgan. Diffuziya sig'imi va differensial o'tkazuvchanligi esa p-n o'tish VAXsi noideallik koeffitsiyenti qiymati ortishi bilan kamayib borishi keltirilgan[18]

Yorug'lik p-n o'tishga tushganda, materialdagi elektronlar fotonlar tomonidan qo'zg'atiladi. Bu jarayon uchun fotonning energiyasi materialning to'g'ridan-to'g'ri yoki bilvosita energiya zonasi kengligidan katta bo'lishi kerak.

$$E_f \geq E_g \quad (1.1)$$

bu yerda $E_f = h\nu$ - foton energiyasi va E_g - materialning taqiqlangan zonasi kengligi.

p-n o'tishning p-qismida joylashgan elektronlar qo'zg'alib, o'tishning n-qismiga o'tadi. Shu jarayonda elektronlar ortiqcha energiya tufayli teshiklar qoldiradi. p-n o'tishdagi ichki elektr maydon (E) ta'sirida qo'zg'algan elektronlar va teshiklar bir-biridan ajraladi: Elektronlar n-tomoniga harakatlanadi, teshiklar esa p-tomonga harakatlanadi. Bu jarayon natijasida material ichida fototok hosil bo'ladi. Elektr maydonning yo'nalishi va intensivligi bu jarayonda muhim ahamiyatga ega.

Bir qatlamli (2D) materiallar, masalan, MoS_2 , WS_2 yoki grafen asosidagi p-n o'tishlarda 2D materiallarning atomik o'lchamlari tufayli yorug'likni samarali yutish va foton energiyasidan foydalana olish qobiliyati yuqori bo'ladi. Elektronlarning diffuziya yo'li qisqaroq bo'lganligi sababli, fototok tezkorlik bilan hosil bo'ladi. Ba'zi 2D materiallar simmetriya buzilishi va kvant effektlari tufayli g'ayrioddiy fototok hosil qilishi mumkin. Masalan, spin-orbital effektlari sababli qo'shimcha fototok komponentlari yuzaga keladi. Fototok yorug'lik intensivligi bilan chiziqli ravishda o'zgaradi, lekin, ma'lum to'lqin uzunliklarda (masalan, infraqizil, ko'rinadigan, yoki ultrabinafsha diapazonda) fototokning kuchayishi kuzatiladi. Agar uzoq vaqt yorug'lik tushsa, materialda issiqlik yoki defektlar tufayli fototok sekinlashishi mumkin.

Bir qatlamli MoS_2 kabi 2D materiallarda fototokning kuchlanishga bog'liqligi murakkab kvant-mexanik jarayonlarga asoslangan bo'lib, bu materialning o'ziga xos elektron tuzilishi va eksiton effektlariga bog'liq. Bir

qatlamli MoS₂ materialida, Brilleon zonadagi K va K' nuqtalari eksitonlarning asosiy joylashgan nuqtalaridir. Eksitonlarning ajralishi va erkin zaryad tashuvchilar (elektron va teshiklar) hosil bo'lishi natijasida fototok hosil bo'ladi. Fototok kuchlanishga bog'liqligi eksiton ajralishi ehtimoli va hosil bo'lgan zaryad tashuvchilarning drift va diffuziya jarayonlari bilan belgilanadi.

Yorug'lik tushganda, eksitonlar quyidagi generatsiya tezligi bilan hosil bo'ladi:

$$G = \frac{\alpha P_{in}}{\hbar \omega} \quad (1.2)$$

bu yerda, α — yorug'likning yutilish koeffitsiyenti (bir qatlamli MoS₂ uchun xarakterli, P_{in} — yorug'likning intensivligi, $\hbar \omega$ — tushayotgan foton energiyasi.

Hosil bo'lgan eksitonlarning bir qismi elektr maydon ($E = \frac{U}{d}$) ta'sirida ajralib, erkin elektron va teshiklarga aylanadi.

Fototok drift va diffuziya jarayonlari orqali hosil bo'ladi:

$$I_f = qA(G\eta) \quad (1.3)$$

bu yerda, q — elektron zaryadi, A — material yuzasi (2D materialda bu qatlam uzunligi va kengligi bilan belgilanadi), η — eksitonlarning kvant samaradorligi.

Eksitonlarning kvant samaradorligi (η) eksitonlarning hosil bo'lishi, rekombinatsiya va generatsiyaga bog'liq bo'ladi.

$$\eta = \frac{N_{yu}}{N_t} \quad (1.4)$$

N_{yu} — yutilgan fotonlar soni, N_t — tushayotgan fotonlar soni

Eksitonlarning kvant samaradorligi (η) elektr maydon kuchlanishiga bog'liq. MoS₂/WSe₂ geterosturukturalariga yorug'lik ta'sir etganda hosil bo'lgan eksitonlar uchun ajralish ehtimoli elektr maydon E ga bog'liq. Har bir eksitonning ajrallish energiyasi. $E = qU$ ga teng. Bu energiya Ferni-Dirak taqsimoti orqali zaryad tashuvchilarning energiya darajalarini belgilaydi.

Fermi –Dirak taqsimot funksiyasi $f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{E - E_F}{kT})}$ dan eksitonlarnig

hosil bo'lishi va ularning ajralish ehtimoli yorug'likning intensivligi va elektr

maydon kuchiga bog'liq bo'lganligi uchun Fermi –Dirak taqsimot funksiyasi yordamida eksitonlarning ajralish ehtimoli energiya baryerini yengib o'tish ehtimoli bilan bog'liq bo'ladi

Ya'ni,

$$\eta = 1 - f(E)$$

(1.3)

(3) ifodaga eksitonlarning ajralish energiyasi $E = qU$ ni qo'ysak,

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + \exp \frac{qU - E_F}{kT}} \quad (1.4)$$

Yuqori xarorat yoki katta kuchlanishda E_F dan energiya olganda, bu ehtimol eksipotensial susayish orqali yaqinlashadi.

Bundan,

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + \frac{eU - E_F}{kT}}, \quad \eta = \frac{e^x}{1 + e^x}, \quad x = \frac{eU - E_F}{kT}$$

$$\eta = \frac{\exp(eU - E_F)}{1 + \exp \frac{eU - E_F}{kT}}, \quad \eta = \frac{e^{\frac{eU}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_F}{kT}}}{1 + e^{\frac{eU}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_F}{kT}}},$$

$C = e^{\frac{E_F}{kT}}$ - o'zgarmas son,

$$\eta = \frac{C \cdot e^{\frac{eU}{kT}}}{1 + C \frac{eU}{kT}}, \quad C = e^{\frac{E_F}{kT}} \ll 1$$

agar $x \ll 1$ bo'lsa, $\frac{x}{1+x} \approx x$, shunda $\eta = C e^{\frac{eU}{kT}}$, $C = e^{-\frac{E_F}{kT}}$ ekanligini hisobga olsak,

$$\eta = C e^{\frac{eU - E_F}{kT}}.$$

Agar, potensial baryer kichik bo'lsa, $\eta = e^{\frac{eU}{kT}}$.

Bundan, $e^x = 1 + x$ agar $x \ll 1$ bo'lsa.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{eU}{kT}} \quad (1.5)$$

(2.25) ifodada 1 - maksimal eksitonlarning ajralish ehtimoli.

$\exp(-\frac{qU}{kT})$ - eksitonlarning energiya to'siqdan o'ta olmagan qismi.

Bu samaradorlik $\eta=f(U)$ bilan ifodalanadi, va odatda eksitonlarning kvant ehtimoli ortib boruvchi funksiya shaklida bo‘ladi. Eksiton kvant samaradorligi elektr maydon bilan quyidagicha bog‘liq:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{qU}{kT}} \quad (1.6)$$

Fototokning kuchlanishga bog‘liqligi:

$$I_f(U) = qA \frac{\alpha P_{in}}{\hbar \omega} (1 - e^{-\frac{qU}{kT}}) \quad (1.7)$$

Bir qatlamli MoS_2 uchun α yuqori bo‘lib, bu materialning samarali fotodetektor sifatida ishlashiga imkon beradi. Materialning strukturasi va haroratga bog‘liq holda β koeffitsiyent o‘zgaradi.

Yuqori kuchlanish ($V \rightarrow \infty$) da fototok maksimal qiymatga yetadi

$$I_f(U) = qA \frac{\alpha P_{in}}{\hbar \omega} \quad (1.7)$$

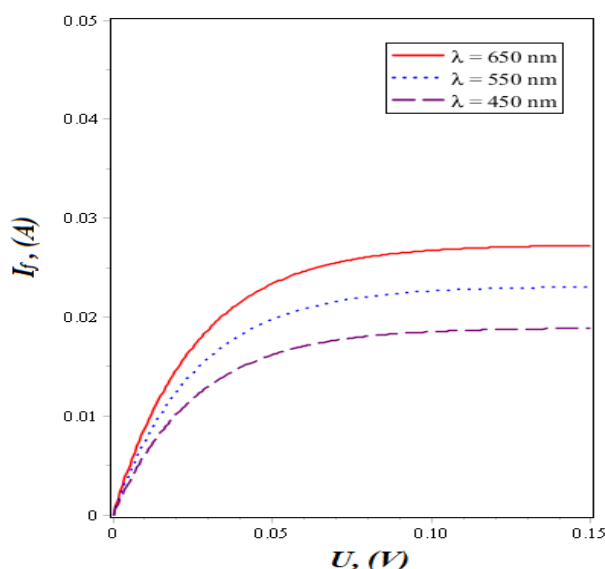
Bir qatlamli MoS_2 uchun yorug‘likning yutilish koeffitsientini aniqlashni nazariy va amaliy usullaridan foydalaniladi: nazariy jihatdan yutilish koeffitsienti α ni hisoblash uchun yorug‘likning chastotasi ω , taqiqlangan zona kengligi E_g , va materialning optik xossalarini hisobga olinadi.

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.8)$$

bu yerda, k — materialning so‘nish koeffitsienti, λ — yorug‘likning to‘lqin uzunligi. Bir qatlamli MoS_2 uchun materialning kompleks so‘nish ko‘rsatkichi $n+ik$ bo‘lib, u tajribalardan yoki zichlikning funksional nazariyasi orqali hisoblab topilishi mumkin.

Yorug‘likning $\lambda = 650$ nm to‘lqin uzunligida materialning so‘nish koeffisienti $k = 0.27$ ga, yutilish koeffisienti esa $\alpha = 5.2 \cdot 10^5 \text{ sm}^{-1}$ teng bo‘ladi [1-3]. Fotoluminestsensiya va Raman spektroskopiya uchun odatda $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2$ yoki undan katta yuzalar tanlanadi. Elektr o‘lchovlar uchun $\sim 5 \times 5 \text{ }\mu\text{m}^2$ dan $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$ gacha bo‘lgan yuzalar ishlatiladi [4-5]. Bir qatlamli MoS_2 dan tayyorlangan fotodetektorlar va quyosh batareyalari uchun $1 - 100 \text{ mW/cm}^2$ intensivlikdagi yorug‘lik ishlatiladi [6].

Bu qiymatlardan foydalanib, (1.8) ifoda yordamida **bir qatlamli MoS₂** uchun hosil bo'lgan fototokning turli to'liqin uzunliklarida kuchlanishga bo'g'liqlik grafigini olish mumkin.



1-rasm. Bir qatlamli MoS₂ uchun turli to'liqin uzunliklarida fototokning kuchlanishga bog'liqligi

Grafikdan ko'rinib turibdiki, past kuchlanishlarda fototok eksponensial o'sadi. Kuchlanish ortishi bilan fototok chiziqli o'sadi va yuqori kuchlanish ($V \rightarrow \infty$) da fototok to'yingan xolatga yaqinlashadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Mak K.F., Lee C., Hone J., Shan J., Heinz T.F. *Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor*. Physical Review Letters, 105, 136805 (2010).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.136805>
2. Splendiani A., Sun L., Zhang Y., Li T., Kim J., Chim C.Y., Galli G., Wang F. *Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂*. Nano Letters, 10(4), 1271–1275 (2010). <https://doi.org/10.1021/nl903868w>

3. Xu X., Yao W., Xiao D., Heinz T.F. *Spin and pseudospins in layered transition metal dichalcogenides*. Nature Physics, 10, 343–350 (2014).
<https://doi.org/10.1038/nphys2942>
4. Furchi M.M., Pospischil A., Libisch F., Burgdörfer J., Mueller T. *Photovoltaic Effect in an Electrically Tunable van der Waals Heterojunction*. Nano Letters, 14(8), 4785–4791 (2014).
<https://doi.org/10.1021/nl501377t>
5. Choi M.S., Qu D., Lee D., Liu X., Watanabe K., Taniguchi T., Yoo W.J. *Lateral MoS₂ p–n Junction Formed by Chemical Doping for High-Performance Optoelectronics*. ACS Nano, 8(9), 9332–9340 (2014).
<https://doi.org/10.1021/nn503659>
6. Lee Y., et al. *Role of interface defects in 2D heterostructure photodetectors*. Advanced Materials, 33(10), 2005934 (2021).
<https://doi.org/10.1002/adma.202005934>
7. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. *2D materials and van der Waals heterostructures*. Science, 353(6298), aac9439 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aac9439>
8. Koppens F.H.L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A.C., Vitiello M.S., Polini M. *Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems*. Nature Nanotechnology, 9, 780–793 (2014).
<https://doi.org/10.1038/nnano.2014.215>
9. Wilson, N. R., et al. “Determination of band offsets, hybridization and exciton binding in 2D MoS₂/WSe₂ heterostructures.” Science Advances, 3(2), e1601832 (2020).. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601832>
10. Rivera, P., et al. “Interlayer excitons in MoS₂/WSe₂ heterobilayers.”

Nature Nanotechnology, 13, 1004–1010 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0278-x>

11. Hong, X., et al. “Ultrafast charge transfer in MoS₂/WSe₂ heterostructures.” *Nature Nanotechnology*, 9, 682–686 (2014). <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.16>
12. Ciarrocchi, A., et al. “Polarization switching and photodetection in MoS₂/WSe₂ p–n junctions.” *Nature Photonics*, 13, 131–136 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0307-5>
13. Unuchek, D., et al. “Room-temperature electrical control of exciton flux in a van der Waals heterostructure.” *Nature*, 560, 340–344 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0357-y>
14. Gulyamov, G., Dadamirzaev, G., Dadamirzayev, M., & Kosimova, M. (2020). The influence of the microwave field on the characteristics of the pn junction. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2(4),
15. Muhammadjon G Dadamirzaev, Mamura O Kosimova, SR Boydedayev, Azamat S Makhmudov Comparison of parameters of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) pn-junction diodes. *Romanian Journal of Physics*, 68(S 603)
16. Gulyamov, G., Dadamirzaev, M. G., Kosimova, M. O., & Makhmudov, A. S. (2025). Alteration of quantum capacitance of 2D metal oxide semiconductor field-effect transistors under the effect of microwave fields. *Results in Optics*, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100931>
17. Gulyamov, G., Dadamirzayev, M. G., Qosimova, M. O., & Boydedayev, S. R. (2023, March). Influence of deformation and light on the diffusion capacity and differential resistance of the pn junction of a strong electromagnetic field.

In AIP Conference Proceedings (Vol. 2700, No. 1, p. 050013). AIP Publishing LLC.

18. Dadamirzaev, M. G., Kosimova, M. O., & Makhmudov, A. S. (2024). Effect of Variation of Non-ideal Ratio on Electrical Properties of PN-Junction in Strong Microwave Field, Theoretical Study. Iranian Journal of Materials Science & Engineering, 21(4). <http://dx.doi.org/10.22068/ijmse.3243>