

SURFACE ENHANCED RAMAN SCATTERING: MECHANISM AND PRACTICAL APPLICATIONS

Sherzodjon Ahmedov

Chirchik State Pedagogical University

Gulnoza Djumayeva

Chirchik State Pedagogical University

ANNOTATION

Today, mankind's need for new and unique high-performance materials is extremely great, and the place and role of nanotechnologies and nanomaterials science, and nanophysics, which form the basis and develop them, in the creation of such materials are incomparably huge. Understanding the effect of surface-enhanced Raman scattering (SSR) and its use in various fields and practical application is currently one of the important tasks of theoretical and experimental experiments of Raman spectroscopy.

Keywords: Surface-enhanced Raman scattering, inelastic scattering, enhancement factor, porous silicon substrate, quadrupole.

SIRTA KUCHAYGAN RAMAN SOCHILISHI: MEXANIZM VA AMALIY QO'LLANILISHI

Sherzodjon Ahmedov

Chirchiq Davlat Pedagogika Universiteti

Gulnoza Djumayeva

Chirchiq Davlat Pedagogika Universiteti

ANNOTATSIYA

Bugungi kunda insoniyatning yangi va noyob xossali, yuqori samarali materiallarga bo'lgan ehtiyoji nihoyatda katta bo'lib, bunday materiallarni yaratishda nanotexnologiyalar va nanomaterialshunoslik, ularning asosini tashkil etadigan va rivojlantiradigan nanofizikaning o'рни va roli beqiyos ulkandir. Sirtida kuchaygan Raman sochilishining (SKRS) ta'sirini tushunish va undan turli sohalarda foydalanish, amaliyotda qo'llash hozirda Raman spektroskopiyasi nazariy va eksperimental tajribalarining muhim vazifalaridan biri bo'lib kelmoqda.

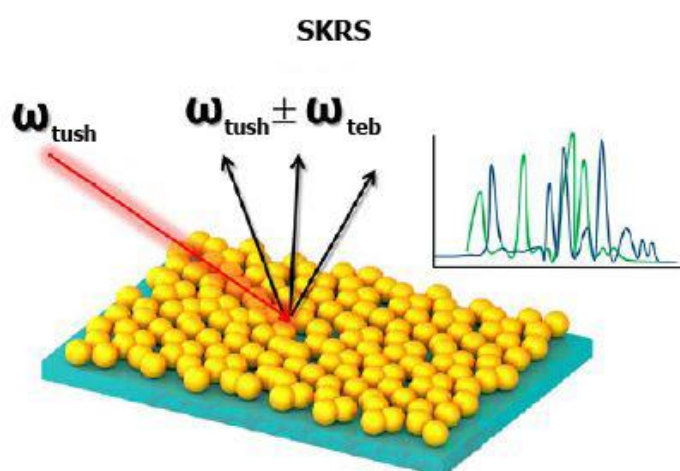
Kalit so'zlar: Sirtida kuchaygan Raman sochilishi, noelastik sochilish, kuchaytirish faktori, g'ovakli kremniy substrati, kvadrupol.

KIRISH

Raman spektroskopiyasi zamonaviy biologiya, tibbiyot va materialshunoslikni o'rganishda keng qo'llaniladigan tahlil usulidir. Raman sochilishining o'ziga xos ta'siri tufayli sirtida kuchaytirilgan Raman sochilishi, Raman sochilgan yorug'likning intensivligini oshirish,

molekulyar va hatto bitta molekulaning past konsentratsiyasini aniqlashni osonlashtirish uchun qo'llanila boshlandi.

Sirtida kuchaygan Raman sochilishi, yoki SKRS, keng qo'llaniladigan yuqori sezgir usuli bo'lib, molekulalar tomonidan yorug'likning noelastik sochilishi (1-rasm) kumush yoki oltin nanozarrachalar (NP) gofirovka qilingan metall yuzalarga molekulalar adsorbsiyalanganida sezilarli darajada kuchayadi (ba'zi hollarda yagona molekulani aniqlashda SKRSning kuchayish faktori 10^8 yoki undan ham kattaroq). 40 yildan ko'proq vaqt oldin kashf etilganidan so'ng SKRS tadqiqot hamjamiyatida doimiy ravishda rivojlanib bordi va optik hodisalarda nanozarrachalardagi plazmon qo'zg'alishidan kelib chiqadigan lokal maydonning kuchayishidan foydalanadigan turli xil spektroskopik usullarni yaratdi.



1-rasm SKRS kumush yoki oltin nanozarrachalar kabi gofirovka qilingan metall yuzalarga adsorbsiyalangan molekulalar tomonidan noelastik yorug'lik tarqalishini o'z ichiga oladi.

Bundan tashqari, SKRS ning atom kuch mikroskopiyasi (AKM) yoki skanlovchi tunnel mikroskopiyasi (STM) zondlari bilan birlashtirilishi kuchli tasvirlash vositasi bo'lgan kuchaytirilgan zondli Raman spektroskopiyasiga (KZRS) olib keldi. Analitik tahlillar uchun SKRSni ko'plab boshqa texnikalardan u taqdim etadigan ma'lumotga boy tebranish spektroskopik ma'lumotlari bilan ajralib turadi, bu esa elektrokimyo, kataliz, biologiya, tibbiyot, materialshunoslik va boshqalarni o'z ichiga olgan turli yo'nalishlarda qo'llanilishiga olib keldi.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

SKRS kashfiyoti nisbatan qisqa tarixga ega. Bu Fleischmann va uning hamkasblari tomonidan 1974 yilda dag'al kumush elektrodalarda piridinning Raman sochilishini o'lchash paytida tasodifan topilgan va ular yaxshilanishni sirt maydoni ta'siriga bog'lashgan [1]. Ushbu hodisa 1977 yilda Janmaire va Van Duyne [2], Albrecht va Creighton [3] tomonidan mustaqil ravishda aniqlangan, ularning ikkalasi ham 10^5 - 10^6 ga kuchaytirish faktorini (KF) taklif qilgan. Plazmon qo'zg'alishi bilan bog'liqlik Albrecht va Creighton tomonidan ilgari Filpott tomonidan taklif qilinganidek, plazmon qo'zg'alishini o'z ichiga olgan rezonansli Raman effekti sifatida taklif qilingan [4]. Keyinchalik, SKRS intensivligining nanostrukturali metallarda lokalizatsiyalangan sirt plazmonlaridan kelib chiqadigan kuchaygan maydon bilan bog'lanishi Moskovits tomonidan qayd etilgan [5]. Yaqin 45 yil ichida, SKRS-da o'n minglab ilmiy

maqolalar nashr etildi, ularda nazariyaning asosiy elementlari, turli xil (asosan, faqat metall emas) kuchaytiruvchi substratlarning dizayni va ularni amalga oshirish batafsil muhokama qilingan [6]. Darhaqiqat, SKRS hayajonli ilmiy hodisalar manbai, shuningdek, hozirda mavjud bo'lgan eng nozik tahlil usullaridan biri sifatida o'ziga xos tadqiqot usuliga aylandi. SKRS ning turli jihatlari va tegishli mavzularda ko'plab mukammal sharh maqolalari va hatto texnikada qo'llanilishining keng qamrovli sharhlari nashr etilgan. Hozirda SKRS tadqiqot va ishlanmalarining eng faol yo'nalishlarini, jumladan, asosiy jihatlari va paydo bo'layotgan hodisalar, materiallar sintezi va asosiy ilovalarni rivojlantirish bo'yicha sa'y-harakatlar olib borilmoqda [7]. Turli bo'limlar nafaqat asosiy va ilg'or tushunchalar va usullarni o'z ichiga oladi, balki biz doimiy ravishda istiqbolni taqdim etishga, shuningdek, kelgusi yillarda nima kutishimiz mumkin, nafaqat hozirgi faol tadqiqotchilarni, balki yosh avlodlarni ham yo'naltirishga va ilhomlantirishga harakat qilamiz.

MODELLASH VA YANGI TUSHUNCHALAR

Modellashtirish va ilg'or nazariyadan foydalanish SKRSni asosiy hodisa sifatida tushunish va turli sharoitlarda va turli muhitlarda olingan eksperimental natijalarni to'g'ri talqin qilish va bashorat qilish uchun zarur bo'ldi. Bu SM/yagona zarracha darajasidagi SKRS uchun, shuningdek, bir necha yoki ko'p molekula/zarrachalarni o'z ichiga olgan ansambllar uchun amal qiladi. SKRS intensivligi va spektrlarini nazariy modellashtirish uzoq tarixga ega bo'lib, u ko'p marta ko'rib chiqilgan [8-15]. Tadqiqotchilar endi umumiy kuchaytirish faktori (KF) bu SKRS substrati bo'lib xizmat qiluvchi metall zarrachalarida plazmonning qo'zg'alishi bilan bog'liq elektromagnit (EM) kuchaytirilishi va ko'pincha metall-molekula bog'lanishining shakllanishi paytida maqsadli molekulalarning metall zarrachalariga va qo'zg'aluvchan holatda elektronlarni uzatish qobiliyatiga bog'liq kimyoviy (CHEM) kuchaytirilishining kombinatsiyasi degan fikrga kelishdi.

Raman signali ω_{tush} chastotali tushayotgan fotonning yutilishidan (1-rasmga qarang), molekulaning ichki erkinlik darajasi bilan bog'liq ω_{teb} molekulyar tebranish chastotasining turli chastotalarda $\omega_{\text{em}} = \omega_{\text{tush}} \pm \omega_{\text{teb}}$ qayta emissiyasidan hosil bo'lib, bu yerda yig'indi/farq mos ravishda anti-Stoks/Stoks Raman sochilishiga olib keladi. Shuning uchun jarayon uchta noelastik o'tishdan iborat (absorbtsiya, tebranish qo'zg'alishi va qayta emissiya); tebranish qo'zg'alishi yuqorida muhokama qilingan kimyoviy o'zaro ta'sir orqali muhitga bog'liq bo'lgan ehtimollik bilan sodir bo'ladi, qolgan ikkita jarayon esa molekulalarning pozitsiyalarida fotonik holatlar mavjudligi bilan boshqariladi. Strukturaviy muhit (masalan, eritmada) bo'lmasa, Raman sochilish jarayoni past ehtimollikka ega bo'lib, optik kesmalar (ya'ni, tushgan fotonlar samarali ravishda chiqarilgan Raman fotonlariga aylanadigan tushuvchi nurning maydoni) bo'yicha $\sim 10^{-11} - 10^{-15} \text{ nm}^2$ miqdoriy ko'rsatkichga ega, bu jarayonning rezonans yoki rezonanssiz Raman sochilish ekanligiga bog'liq (ya'ni, tushuvchi yorug'lik molekulaning asosiy va uyg'ongan elektron holatlari o'rtasidagi o'tishlar bilan rezonansga egami yoki yo'qmi). Raman sochilishning past intensivlikka ega ekanligi ko'plab amaliy qo'llanmalar uchun yetarli emas va shuning uchun Raman sochilish jarayonini yaxshilash vositalarini topish ko'pincha foydalidir. Bunday vositalar mos rezonansli tuzilmalar tomonidan yaratilgan optik maydonni yuqori darajada kuchaytirilishi bilan ta'minlangan. Xususan, dastlabki yutilish jarayoni molekuladagi lokal elektr maydon kuchlanganligiga to'g'ri proporsional bo'lib, u tushayotgan

yorug'lik intensivligi bilan taqqoslaganda, metall nanostrukturalarda plazmonlar tomonidan keskin kuchaytirilishi mumkin. Yagona nanozarralarda elektr maydonni kuchaytirish orqali SKRS ni olish mumkin bo'lsa-da, murakkabroq strukturadan foydalanish, masalan, molekullarni ikkita metall zarrachalari (qaynoq nuqtalar) orasidagi nanometr o'lchamdagi bo'shliqlarga joylashtirish foydalidir, bu odatda $KF \approx 10^5-10^6$ gacha bo'lgan intensivligiga erishish imkonini beradi [16-19].

Issiqlik nuqtalar nafaqat nanozarrachalar orasidagi bo'shliqlarda, balki plazmon rezonanslarini qo'llab-quvvatlaydigan nanozarrachalar va tekis metall sirtlarning birlashmalarida ham paydo bo'lishi mumkin. Natijada hosil bo'ladigan maydon kuchi bo'shliqlar oralig'i va boshqa geometrik tafsilotlarga bog'liq. Xususan, elektromagnit maydonning amplitudasi bo'shliqqa taxminan teskari bog'liqlikka ega. Klassik elektromagnetizm nuqtai nazaridan bo'shliq o'lchami 2-10 nm oralig'ida bo'lganda SKRS issiqlik nuqtasining asosiy xususiyatlari qoniqarli tarzda tavsiflanadi, lokal bo'lmagan ta'sirlar e'tiborga olinmasa, faqat strukturada materiallarning chastotaga bog'liq dielektrik funksiyalari ko'rib chiqiladi. Nanozarrachalar oralig'i 1 nm dan kamaytirilganda, lokal bo'lmagan effektlar paydo bo'ladi, bu esa optik natijalarni yanada murakkab qayta ishlashni talab qiladi. Bundan tashqari, bunday kichik masofalarda EM maydonlarining kuchayishi shunchalik kattaki, optik javob chiziqli bo'lmagan bo'lishi mumkin (ya'ni, chiziqli bo'lmagan effektlar uchun chegara maydon kuchayishi bilan teskari ravishda kamayadi). Ushbu kuchli bog'lanish rejimida molekula-nanozarracha tizimining ichki xususiyatlari sezilarli darajada o'zgarishi mumkin, bu esa o'z navbatida SKRS intensivligiga ta'sir qiladi. Masalan, kimyoviy reaksiyalarni qo'zg'atish yoki katalizlash, adsorbsiyalangan molekulaning fotofizik yoki fotokimyoviy xususiyatlarini o'zgartirish, qo'zg'alish dinamikasini va nanozarrachalar yuzasida molekulyar opto-mexanik effektlarni o'zgartirishi mumkin bo'lgan issiqlik elektronlarning paydo bo'lishini o'z ichiga oladi. Ekstremal bog'lanish rejimida (masalan, nanometr o'lchamdagi bo'shliq ichidagi bitta molekula yoki pikokavit) klassik modellar bunda haqiqiy emas va kvant-mexanik yondashuvlarga asoslangan tavsiflar bilan to'ldirilishi kerak. Shu sababli, subnano- va nano-miqyosdagi faol nuqtalarda Raman sochilishi va raqobatlashuvchi jarayonlarni o'ziga xos va aniq modellashtirish eksperimental natijalarni qo'llab-quvvatlash yoki izohlash kerakli SKRS javobiga ega substratlarni ishlab chiqish uchun juda muhimdir.

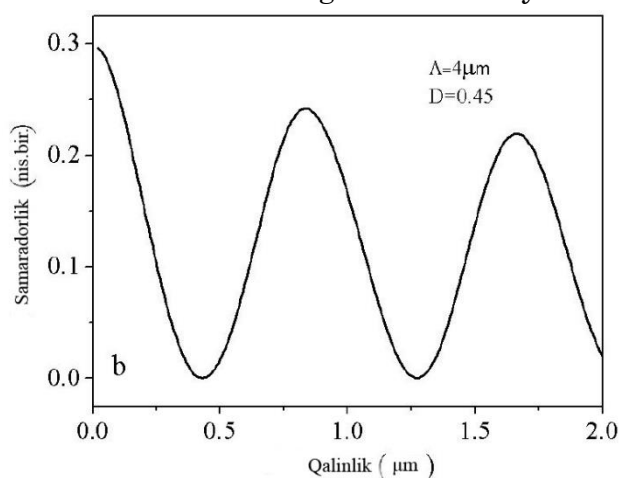
SIRTDA KUCHAYTIRILGAN RAMAN SOCHILISH MEXANIZMLARI: ELEKTROMAGNIT MAYDONNI KUCHAYTIRISH.

Elektromagnit maydon kuchayish faktori ko'plab tadqiqotlar mavzusi bo'lib, odatda elektrodinamik hisoblashlardan foydalangan holda ω chastotada SKRS substratida plazmonlar qo'zg'atilganda yuzaga keladigan kuchaygan elektr maydon amplitudasi $E(\omega)$ ni aniqlash; Keyin $E(\omega)$ molekulyar pozitsiyalarda baholanadi. SKRS kuchayishi odatda yoritilgan molekullar bo'yicha $|E(\omega)|^4/|E_0|^4$ ni o'rtacha hisoblash orqali taxmin qilinadi, bunda E_0 - tushuvchi (lazer) maydon amplitudasi. Aslida, bu analitik natija Stoks siljishini e'tiborsiz qoldiradi, uni biroz aniqroq ifoda orqali kiritish mumkin: $|E(\omega)|^2|E(\omega')|^2/|E_0|^4$, bu yerda ω' - Raman sochilish chastotasi. Noelastik emission dipol emissiyasini to'g'ri hisobga olish uchun $|E(\omega')|^2$ faktorni to'g'rilash orqali ham biroz aniqroq yaqinlashuv olinadi (ba'zan dipolning qayta nurlanishi deb ataladi [20]). Yana bir muhim muammo, ko'pincha plazmon bilan kuchaygan maydonning kuchli fazoviy lokalizatsiyasi

natijasida paydo bo'ladigan sezilarli maydon gradiyentlari bilan bog'liq [21,22]; bu gradientlar dipolyar bo'lmagan komponentlarni o'z ichiga oladi, ular dipol-kvadrupol va kvadrupol-kvadrupol kirish-chiqish polarizatsiyasini o'z ichiga olgan samarali SKRSni taqdim qilishi mumkin; Bu ta'sirlar molekulada ko'proq fazoviy delokalizatsiyalangan elektron holatlarni o'z ichiga olgan o'tishlar uchun kuchliroq bo'ladi. Dipolning qayta nurlanishi va maydon gradienti ta'siriga asoslangan hisob-kitoblar kamdan-kam hollarda amalga oshiriladi, chunki nanozarrachalar strukturalari tahlilda ushbu darajadagi tafsilotlarni kafolatlash uchun yetarlicha aniq ma'lum emas. Darhaqiqat, ko'pgina hollarda $|E(\omega)|^4$ ifodasi taxminiy kattalik sifatida yaxshi natijalar beradi. Aslida, 10 yil oldin Schatz va Van Duyne nanozarrachalar klasterlari bo'yicha tadqiqotlarida nazariyaning ushbu darajasidan foydalangan va nanozarrachalar klasterlari uchun elektromagnit kuchaytirish faktori ko'pincha plazmon rezonanslari "qorong'i" bo'lgan to'lqin uzunliklarida eng yuqori qiymatda (eksperimental ravishda $\sim 10^9$) ekanligini ko'rsatdi (ya'ni, so'nish spektrida maksimal emas, balki pasayishga mos keladigan to'lqin uzunliklarida) [23,24]. Ko'pincha to'rt qutbli xarakterga ega bo'lgan qorong'u plazmon rejimlari, shunga qaramay, nanozarralar orasidagi elektromagnit nuqtalarda kuchli elektr maydonlarini hosil qilishi mumkin.

NATIJJALAR VA MUHOKAMA

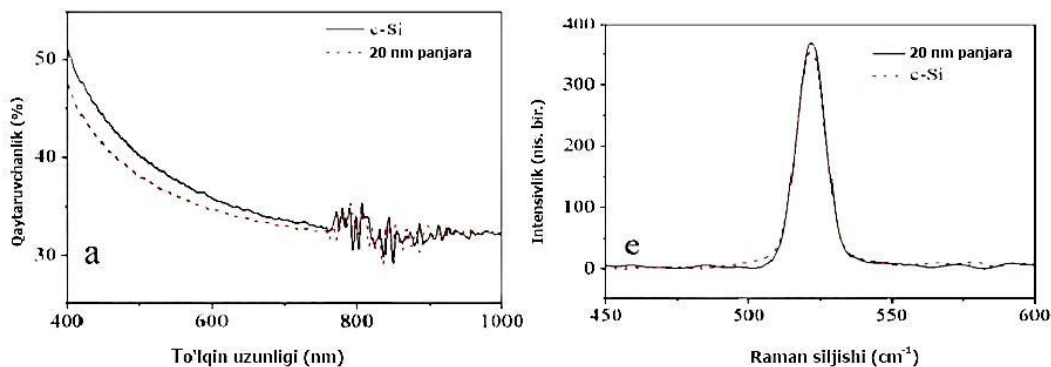
Sochilish va diffraksiyaning optik xususiyatlari yorug'lik to'lqini panjaraga ta'sir qilganda namoyon bo'ladi. Panjara fotonning sochilish yo'lini kengaytirishi mumkin. Shu bilan birga, akslangan yorug'lik to'lqini panjara yuzasiga interferensiya hodisasini keltirib chiqarishi mumkin, bu esa doimiy to'lqinni hosil qiladi va bu sekinlashgan yorug'lik effekti deb ataladi. Sekinlashgan yorug'lik effekti yutuvchi qatlamda yorug'lik tarqalish tezligini pasaytiradi va yorug'lik va muhit o'rtasidagi ta'sir vaqtini oshiradi. Qat'iy to'lqin tahlili (RCWA) [24] panjara maydoni va diffraksiya samaradorligini simulyatsiya qilish uchun ishlatilgan. tushish burchagi 5° ga teng. Yassi tekislik diffraksiyasi bilan solishtirganda, to'rtburchakli panjara ham elektr, ham magnit maydon komponentiga yaxshi lokal ta'sir ko'rsatadi. Bu umumiy sochilish samaradorligini oshirishi va Raman signalini kuchaytirishi mumkin.



2-rasm. Akslantirish difraksiya samaradorligi panjara g'ovak lari chuqurligiga qarab o'zgarib turadi (panjara davri 4 mkm, to'ldirish koeffitsienti 0,45, nolinci tartib o'lchangan)

2-rasmda panjara g'ovagining qalinligiga qarab akslantirish diffraktsiyasining samaradorligining o'zgarishini ko'rsatadi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, panjara qalinligi 500 nm dan kam bo'lsa, akslantirish diffraktsiyasining samaradorligi asta-sekin kamayadi.

3-(a) rasmda 5° kirish burchagida nolinchida tartibda o'lchanadigan turli chuqurlikdagi to'rtburchak o'yiqli kremniy panjarasining akslantirish spektrlarini taqdim etadi. Akslantirish to'lqin uzunligi ortishi bilan kamayadi. Kremniy panjaralari ham, silliq kremniy ham 785 nm da kam akslantirishga ega, bu qo'zg'atuvchi yorug'likdan samarali foydalanish uchun qulaydir. Biz tayinlagan o'yiqli chuqurliklari mos ravishda 20nm, 30nm, 50nm va 500nm. Tekis struktura bilan solishtirganda, kremniy panjaraning akslantirish qobiliyati sezilarli darajada kamayadi. G'ovakning chuqurligi 20 nm dan 500 nm gacha bo'lganligi sababli, akslantirish darajasining pasayishi kuzatiladi. Eksperimental natijalar nazariy hisob-kitoblarga mos keladi. G'ovak chuqurligi oshishi bilan tarqalish samaradorligi yaxshilanadi. Yorug'likning tasvir hosil qilish qobiliyati yaxshilanadi, bu kremniy materiallarida Raman sochilish samaradorligini oshiradi. Kremniy panjarasi 500 nm chuqurlikdagi g'ovagi uchun 700 nm-900 nm diapazonida deyarli zaif akslantirish namoyon bo'ladi. Bunday holda yorug'lik asosan panjara orqali o'tadi va yorug'lik energiyasidan foydalanish yaxshilanadi.



3-rasm. Kremniy panjarasi va planar kremniyda olingan qaytaruvchanlik va Raman spektrlari. Kremniy panjaralarning chuqurliklari mos ravishda: (a) va (e) 20nm; Fresnel faktorining o'zgarishini va Raman sezgirlik tenzorining modifikatsiyasini hisobga olgan holda, panjara uchun Raman sochilishining Stokes (S) komponentining intensivligi quyidagi tenglama bilan aniqlanadi [25]:

$$I_s \sim \frac{T_s T_L v_s}{(\alpha_s + \alpha_L) n_s n_L} \times |\bar{e}_L \bar{e}_s \chi_s|^2 \quad (1)$$

bu yerda S – Stoks sochilishi, L – uyg'otuvchi yorug'lik, T_L , α_L va n_L - mos ravishda uyg'otuvchi yorug'lik chastotasida o'tkazish koeffitsienti, yutilish koeffitsienti va sinishi ko'rsatkichi; v_s sochilish chastotalari, T_s o'tkazish koeffitsientlari, α_s yutilish koeffitsientlari, n_s sinishi ko'rsatkichlari; χ_s Stoks tashkil etuvchisi uchun Raman sezuvchanlik; \bar{e}_L , \bar{e}_s mos ravishda elektr maydonlari uchun birlik vektorlari.

3-(e) rasm turli chuqurlikdagi kremniy panjaralarining Raman spektrlarini ko'rsatadi. Bu yerda uyg'otuvchi to'lqin uzunligi infraqizil sohaga yaqin bo'lib, 785 nm ni tashkil qiladi, bu Raman o'lchashlari vaqtida ortiqcha fluorension signalni kamaytiradi va biologik kuzatishlar sohasida uning imkoniyatlarini ko'rsatadi. Kremniy panjarasining Raman signali g'ovak chuqurligi bilan yuqori darajada sezilarli bog'liqlikka ega. (1) tenglamaga ko'ra, g'ovak chuqurligi oshishi bilan effektiv Raman sochilishining kuchli o'sishi kutiladi. Silliq yassi

kremniyning Raman signali bilan solishtirganda, g'ovakli kremniy panjarasining Raman signali kuchaygan bo'ladi. Raman signalining kuchayishini quyidagicha tushuntirishimiz mumkin: to'rtburchak g'ovak panjarasi strukturasi diffraktsiya ta'siri yorug'likning bir qismini yo'nalishli sochilish hosil qilishga sabab bo'ladi va qo'zg'atuvchi yorug'lik bilan muhitning o'zaro ta'sirlashuvchi samarali qismini oshiradi.

Past konsentratsiyali Raman signalini aniqlash uchun biz kuchliroq Raman signalini olish uchun substratlarga kumush nanozarrachalarini kiritish orqali RSK mumkin. Agar kumush nanozarrachalari tartibli tarzda joylashtirilgan bo'lsa, samarali davriy tuzilishi yuqori SKRS va bir xil signalga olib kelishi mumkin. Xususan, yuqori sezgir SKRS sensori uchun sifatli va aniq tartibli joylashgan Ag NPs/g'ovakli kremniy panjaralari kutilmoqda. G'ovakli kremniy panjarasiga yotqizilgan Ag NPlari SKRS reaksiyasini yanada kuchaytiradi. SKRS ning kuchayish faktori (KF) quyidagicha aniqlanadi:

$$KF = \frac{I_{SERS}/N_{SERS}}{I_{RS}/N_{RS}} \quad (2)$$

bu yerda, I_{SKRS} va I_{RS} mos ravishda SKRS intensivligi va kuchaytirilmagan Raman sochilish spektrlari; N_{SKRS} va N_{RS} mos ravishda faol SKRS namunasi va qoplamasiz dielektrik substratlarga tegishli lazer uyg'otgan sohadagi molekulalar soni.

XULOSA

Ushbu maqolada biz panjara tuzilishini monokristalli kremniyning Raman signalini kuchaytirishning qulay usuli sifatida tanishtirdik. G'ovakli kremniy panjarasining Raman signalini kuchaytirishi kremniyning boshqa shakllariga qaraganda ko'proq namoyon bo'ladi. 30nm kremniy panjarasidagi zaif Raman signalini g'ovakli kremniy panjara tuzilishi bilan to'rt marta oshirish mumkin. Biz yangi SKRS substrat tizimini yaratish uchun Ag NPs va g'ovakli kremniy panjarasini birlashtirdik. Ag NPs / g'ovakli kremniy panjara substratida R6G ning aniqlanishi Ag NPs tekis g'ovakli kremniy substratiga nisbatan sezilarli SKRS natijasini beradi. Ushbu substrat yordamida Raman signalining intensivligi kamida ikki baravar oshiriladi.

REFERENCES

1. Xu, X., Li, H., Hasan, D., Ruoff, R. S., Wang, A. X. and Fan, D. L. (2013), Near-Field Enhanced Plasmonic-Magnetic Bifunctional Nanotubes for Single Cell Bioanalysis.
2. Blackie, Evan J.; Le Ru, Eric C.; Etchegoin, Pablo G. (2009). "Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Spectroscopy of Nonresonant Molecules". *J. Am. Chem. Soc.* 131 (40)
3. Blackie, Evan J.; Le Ru, Eric C.; Meyer, Matthias; Etchegoin, Pablo G. (2007). "Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: A Comprehensive Study". *J. Phys. Chem. C.* 111 (37): 13794–13803. CiteSeerX 10.1.1.556.4418
4. Nie, S; Emory, SR (1997). "Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering". *Science.* 275 (5303): 1102–6.doi:10.1126/science.275.5303.1102
5. Le Ru, Eric C.; Meyer, Matthias; Etchegoin, Pablo G. (2006). "Proof of Single-Molecule Sensitivity in Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) by Means of a Two-Analyte Technique". *J. Phys. Chem. B.* 110 (4): 1944–1948.

6. Fleischmann, M.; PJ Hendra & AJ McQuillan (15 May 1974). "Raman Spectra of Pyridine Adsorbed at a Silver Electrode". *Chemical Physics Letters*. 26
7. Jeanmaire, David L.; Richard P. van Duyne (1977). "Surface Raman Electrochemistry Part I. Heterocyclic, Aromatic and Aliphatic Amines Adsorbed on the Anodized Silver Electrode". *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 84
8. Albrecht, M. Grant; J. Alan Creighton (1977). "Anomalously Intense Raman Spectra of Pyridine at a Silver Electrode". *Journal of the American Chemical Society*. 99
9. "Technical Highlights. New Probe Detects Trace Pollutants in Groundwater" Oak Ridge National Laboratory Review. 26 (2). Archived from the original 2010-01-15.
10. Barbiellini, Bernardo (February 2017). "Enhancement of Raman scattering from molecules placed near metal nanoparticles"
11. Strommen, Dennis P.; Nakamoto, Kazuo (August 1977). "Resonance raman spectroscopy". *Journal of Chemical Education*. 54 (8): 474.
12. Yang, Shikuan; Dai, Xianming; Stogin, Birgitt Boschitsch; Wong, Tak-Sing (2016). "Ultrasensitive surface-enhanced Raman scattering detection in common fluids" *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 113 (2): 268–273. Bibcode:2016PNAS..113.268Y
13. "Single-molecule detection of contaminants, explosives or diseases now possible "Kurzweil" (<http://www.kurzweilai.net/single-molecule-detection-of-contaminants-explosives-or-diseases-now-possible>).
14. Smith, E.; Dent, G., *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach* (https://books.google.com/books?id=IpVcyQr_1DAC&printsec=frontcover). John Wiley and Sons: 2005 ISBN 0-471-49794-0
15. Kukushkin, V. I.; Van'kov, A. B.; Kukushkin, I. V. (2013). "Long-range manifestation of surface-enhanced Raman scattering".
16. L. Bulavin, I. Doroshenko, O. Lizengevych., V. Pogorelov, L. Savransky, O. Veretennikov. Raman study of molecular associations in methanol. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 5507, 138 (2004).
17. F.H. Tikhvatullin, V.E. Pogorelov, A. Jumabaev, H. Hushvaktov, A. Absanov, A. Shaymanov. Aggregation of molecules in liquid methyl alcohol and its solutions. Raman spectra and ab initio calculations. *J. Mol. Struct.* 881, 52 (2008).
18. Bjarnason J.6., Hudson B.S., Andersen H.C. Quantum theory of line shapes in coherent Raman spectroscopy of gases and liquids // *J. Chem. Phys.* 1979. V.70. N. 9. P. 4130-4148.
19. Bianco R., Timoneda J.J., Hynes J.T. Equilibrium and Nonequilibrium Solvation and Solute Electronic Structure. Quantum Theory in a Multidiabatic State Formulation // *J. Phys. Chem.* 1994. V. 98. N. 47. P. 12103-12107.
20. Neese F. The ORCA program system. // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*. 2012/ V.2. N.1. P. 73-78.
21. Desbat B., Huong P. Structure of liquid hydrogen fluoride studied by infrared and Raman spectroscopy II *J. Chem. Phys.* 1983. V.78. N.1. P. 6377-6381
22. F.H. Tikhvatullin, V.E. Pogorelov, A. Jumabaev, H. Hushvaktov, A. Absanov, A. Usarov. Polarized components of Raman spectra of O–H vibrations in liquid water. *J. Mol. Liquids*. 160, 88 (2011).

23. F.H. Tukhvatullin, A. Jumabaev, G. Muradov, H. Hushvaktov, A. Absanov. Raman spectra of C–H vibrations of acetonitrile in aqueous and other solutions. Experimental results and ab initio calculations. *J. Raman Spectrosc.* 36, 932 (2005).
24. Jr. C.W. Bauschlicher, A. Ricca. On the calculation of the vibrational frequencies of C₆H₄. *Chem. Phys. Lett.* 566, 1 (2013).
25. B.J. Ka, E. Geva. Vibrational energy relaxation of polyatomic molecules in liquid solution via the linearized semiclassical method. *J. Phys. Chem. A* 110, 9555 (2006).
26. S.A. Kirillov, A. Morresi, M. Paolantoni. Recovery of the depolarization ratio of single lines from overlapping isotropic and anisotropic Raman profiles and assignment of molecular vibrations, with special reference to toluene and toluene-d₈. *J. Raman Spectrosc.* 38, 383 (2007).