UO‘K 621.373.8

MAGNIT MAYDON TA’SIRIDA MISNING LAZERLI ABLATSIYASI: PLAZMA-SIRT ISSIQLIK ALMASHINUVI VA ABLATSIYA CHUQURLIGI

Ibadullayev Navruzbek Atabayevich,
Urganch davlat universiteti Fizika kafedrasi o‘qituvchisi
navruzbekibadullayev84@gmail.com

Annotatsiya. *Mazkur ishda ikkinchi garmonikadagi nanosekundli lazer impulslari yordamida misning magnit maydon ko‘magidagi lazerli ablatsiyasi bo‘yicha sonli va eksperimental tadqiqotlar natijalari keltirilgan. Xususan, magnit maydon mavjud bo‘lmagan sharoitda hamda 0,2 T magnit maydon ta’sirida bug‘lanish va erigan moddaning otilib chiqishi natijasida yuzaga keladigan ablatsiya chuqurligiga asosiy e’tibor qaratildi. Har ikkala holatda ham inkubatsiya effekti kichik bo‘lib, magnit maydon mavjudligida u biroz yaqqolroq namoyon bo‘ldi. Magnit maydon ko‘magidagi lazerli ablatsiyada ablatsiya tezligi yuqoriroq ekanligi aniqlandi. Bu holat issiqlik uzatilishi hisobiga plazma-nishon o‘zaro ta’sirining kuchayishi bilan izohlanadi. Magnit maydon ablatsiyaga uchragan misning periferik sohasida hosil bo‘lgan CuO nanozarrachalarining fotolyuminessensiya cho‘qqilari intensivligini oshiradi. Plazma-sirt o‘rtasidagi energiya almashinuvini hisobga olgan holda olingan sonli modellashtirish natijalari eksperimental natijalar bilan juda yaxshi mos kelishi aniqlandi. Bundan tashqari, xuddi shu sonli hisoblash modeli yordamida yana ikkita metall - xrom va ruxning harorat profillari hamda termik kuchlanishlari o‘rganildi. Magnit maydon mavjudligidagi harorat va termik kuchlanish qiymatlari magnit maydonsiz holatdagiga nisbatan yuqori ekanligi aniqlandi. Shuningdek, magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda sirt g‘adir-budurligining harorat profillariga ta’siri aniqlandi. Ushbu tadqiqot natijalari magnit maydon ta’sirida mis, xrom va rux kabi metallarning lazerli ablatsiya tezligini oshirish uchun foydali bo‘lishi mumkin.*

Kalit so‘zlar: *lazerli ablatsiya, magnit maydon, lazer plazmasi, plazma-sirt o‘zaro ta’siri, ablatsiya chuqurligi.*

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ МЕДИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ: ПЛАЗМЕННО-ПОВЕРХНОСТНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ГЛУБИНА АБЛЯЦИИ

Аннотация. *В данной работе представлены результаты численных и экспериментальных исследований лазерной абляции меди в присутствии магнитного поля с использованием наносекундных лазерных импульсов второй гармоники. Особое внимание уделено глубине абляции, обусловленной испарением и выбросом расплавленного материала, как в отсутствие магнитного поля, так и при воздействии магнитного поля с индукцией 0,2 Тл. В обоих случаях инкубационный эффект оказался незначительным, при этом в присутствии магнитного поля он проявлялся несколько более выраженно. Установлено, что при лазерной абляции в присутствии магнитного поля скорость абляции выше. Данный эффект объясняется усилением взаимодействия плазмы с мишенью вследствие интенсификации теплопередачи. Магнитное поле повышает интенсивность пиков фотолюминесценции наночастиц CuO, образующихся в периферийной области лазерно-аблированной поверхности меди. Установлено, что результаты численного моделирования, учитывающего энергетический обмен между плазмой и поверхностью, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Кроме того, с использованием той же численной модели исследованы температурные профили и термические напряжения ещё для двух металлов - хрома и цинка. Установлено, что значения температуры и термических напряжений в присутствии магнитного поля выше, чем в его отсутствие. Также определено влияние шероховатости поверхности на температурные профили как при наличии, так и при отсутствии магнитного поля. Полученные результаты могут быть полезны для повышения скорости лазерной абляции таких металлов, как медь, хром и цинк, под воздействием магнитного поля.*

Ключевые слова: *лазерная абляция, магнитное поле, лазерная плазма, взаимодействие плазмы с поверхностью, глубина абляции.*

LASER ABLATION OF COPPER IN A MAGNETIC FIELD: PLASMA-SURFACE HEAT EXCHANGE AND ABLATION DEPTH

Abstract. *This study presents the results of numerical and experimental investigations of magnetic-field-assisted laser ablation of copper using second-harmonic nanosecond laser pulses. Particular attention was paid to the ablation depth resulting from evaporation and the ejection of molten material, both in the*

absence of a magnetic field and under a magnetic field of 0.2 T. In both cases, the incubation effect was small, although it was slightly more pronounced in the presence of the magnetic field. A higher ablation rate was observed during magnetic-field-assisted laser ablation. This enhancement is attributed to intensified plasma–target interaction resulting from increased heat transfer. The magnetic field also increases the intensity of the photoluminescence peaks of CuO nanoparticles formed in the peripheral region of the laser-ablated copper surface. The numerical simulation results, obtained by taking into account the energy exchange between the plasma and the surface, were found to be in very good agreement with the experimental results. In addition, the same numerical model was used to investigate the temperature profiles and thermal stresses of two other metals, chromium and zinc. The temperature and thermal stress values in the presence of the magnetic field were found to be higher than those obtained without the magnetic field. The influence of surface roughness on the temperature profiles was also determined both in the presence and absence of the magnetic field. The results of this study may be useful for enhancing the laser ablation rate of metals such as copper, chromium, and zinc under the influence of a magnetic field.

Keywords: *laser ablation, magnetic field, laser-induced plasma, plasma–surface interaction, ablation depth.*

Kirish. Qattiq materiallarning impulsli lazer yordamida ablatsiyasi hamda plazma-lazer o‘zaro ta’siri mikroishlov berish, nanozarrachalar sintezi, burg‘ilash va payvandlash hamda spektroskopiya kabi sohalarda qo‘llash imkoniyatlari nuqtayi nazaridan keng o‘rganilgan. Biroq lazer-modda va lazer-plazma o‘zaro ta’sirlari nihoyatda murakkab jarayonlar bo‘lganligi sababli, lazer yordamida hosil qilingan plazmani (LPP) tadqiq etishda sonli hisoblash usullaridan samarali foydalanib kelinmoqda. Nazariy model asosida Amoruso metall nishonlarning ultrabinafsha impulsli lazer yordamida ablatsiyasini fotonlarning yutilishi va ionlanish mexanizmlari, shuningdek, plazmadagi kinetik jarayonlarni hisobga olgan holda o‘rgangan va nazariy natijalarning eksperimental natijalar bilan mos kelishini ko‘rsatgan. Issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi asosida lazerli ablatsiya jarayonini modellashtirish uchun chekli elementlar usulidan (FEM) foydalanilgan. Plazmada lazer nurlanishining yutilishi hamda haroratga bog‘liq termofizik parametrlarni hisobga olgan FEM modeli qoniqarli natijalarni ko‘rsatgan [1-6].

So‘nggi yillarda ko‘plab tadqiqotchilar magnit maydondan turli maqsadlarda, jumladan, lazer ta’sirida material massasining olib tashlanish tezligini oshirish, lazer yordamida hosil qilingan mikrokanallar sirtini silliqlash, lazerli burg‘ilash chuqurligini oshirish, plazma oqimlarini boshqarish, kavitatsion pufakchalar o‘lchamini kattalashtirish hamda optik emissiya intensivligini kuchaytirish uchun foydalanib kelmoqdalar. Kremniyning magnit maydon ko‘magidagi nanosekundli lazer ablatsiyasini o‘rganishda ablatsiya chuqurligining sezilarli darajada ortishi kuzatilgan va bu hodisa nurlanishning magnito-yutilishi bilan izohlangan. Magnit maydon ko‘magidagi lazerli mikroishlov berishda kanalning tomonlar nisbatini ham oshirish mumkin [7-16].

Shu bilan birga, magnit maydon kuchlanganligi, lazer quvvati va chastotasi kabi ishlov berish parametrlarini optimallashtirish zarurligi qayd etilgan bo‘lib, buni sonli hisoblash usullari yordamida ham amalga oshirish mumkin. Magnit maydon mavjudligidagi lazer plazmasida plazmaning fazoviy cheklanishi kuzatiladi va bu, o‘z navbatida, nishonga issiqlik uzatilishining ortishiga olib keladi. Issiqlik uzatilishining kuchayishi nishondan ko‘proq miqdorda material olib tashlanishiga sabab bo‘ladi. Bundan tashqari, bu jarayon nishon sirtiga zarrachalarning cho‘kishini ham kuchaytiradi. Magnit maydonlarda plazmaning evolyutsiyasini o‘rganish uchun sonli modellashtirish usullaridan ham foydalanilgan. Pathak va boshqalar nanozarrachalar sintezi maqsadida magnit maydondagi uglerod plazmasi oqimining dinamikasini sonli usullar yordamida tadqiq qilganlar. Biroq, bizga ma’lum bo‘lgan adabiyotlar doirasida, magnit maydon ko‘magidagi lazerli ablatsiya chuqurligi yoki material massasining olib tashlanish tezligini sonli modellashtirishga bag‘ishlangan tadqiqotlar yetarli darajada yoritilmagan[17-19]**.**

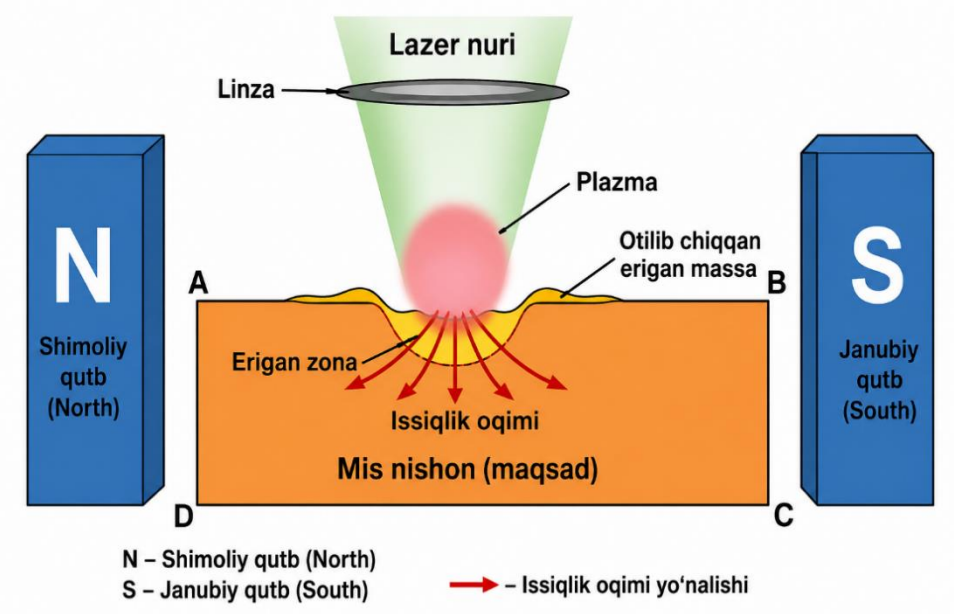
Bundan tashqari, lazerli ablatsiya chuqurligini modellashtirish bo‘yicha avvalgi tadqiqotlarning kamchiliklaridan biri plazmadan nishon sirtiga issiqlik uzatilishining hisobga olinmaganligi hisoblanadi. Mazkur ishda ablatsiya chuqurligining ortish mexanizmini tushuntirish maqsadida plazmadan issiqlik uzatilishi ta’sirlarini hisobga olgan holda chekli elementlar usuli (FEM) va COMSOL Multiphysics dasturiy ta’minoti yordamida magnit maydon ko‘magidagi lazerli ablatsiya jarayonini modellashtirishga harakat qilindi. Eksperimental tadqiqotlarda misning lazerli ablatsiyasi magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda, nishon sirtiga turli miqdordagi lazer impulslarini N = 10, 30, 50, 70 va 90 yo‘naltirish orqali o‘rganildi. Mazkur natijalar mualliflarning avvalgi tadqiqotlarida keltirilmagan. Olingan eksperimental natijalar sonli hisoblash natijalari bilan yaxshi mos keladi.

Sonli model eksperimental natijalar asosida tasdiqlangandan so‘ng, xuddi shu hisoblashlar yana ikkita metall - xrom va rux uchun magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda amalga oshirildi.

Ushbu metallarga qiziqishimizning asosiy sababi ularning gaz sensorlari, quyosh elementlari, himoya qoplamalari, katalitik tizimlar va optoelektronika kabi turli sohalarda yupqa plyonkalar sifatida keng qo‘llanilishidir. Shunday qilib, magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda lazerli ablatsiya jarayonini o‘rganishga bag‘ishlangan mazkur tadqiqot yupqa plyonkalarni cho‘ktirish jarayonlarida ablatsiya tezligini optimallashtirishga xizmat qiladi [20-21].

Natijalar va muhokama. Misning eksperimental lazerli ablatsiyasi 1(a)-rasmda magnit maydon mavjudligida lazerli ablatsiya jarayonining sxematik tasviri keltirilgan. Nd:YAG lazerining magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda yuqori tozalikdagi (99,99%) misni qanday ablatsiyalashini o‘rganish uchun to‘lqin uzunligi 532 nm, takrorlanish chastotasi 10 Hz va impuls davomiyligi 10 ns bo‘lgan lazer nurlanishidan foydalanildi. Lazer nuri fokus masofasi 15 cm bo‘lgan linza yordamida mis sirtiga normal yo‘nalishda fokuslandi. Mis sirtidagi lazer dog‘ining o‘lchami 0,6 mm ni tashkil etdi. Mis nishoni linzaning fokus nuqtasidan 5 mm yuqorida joylashtirildi. Eksperimental lazer dog‘ining diametri yuqori aniqlikdagi optik mikroskop yordamida bitta impuls ta’sirida fotog‘ozda hosil qilingan sirt profili asosida o‘lchandi. Tajriba davomida mis sirtidagi lazer energiyasi zichligi 14 J/cm² qiymatda o‘zgarmas saqlandi.

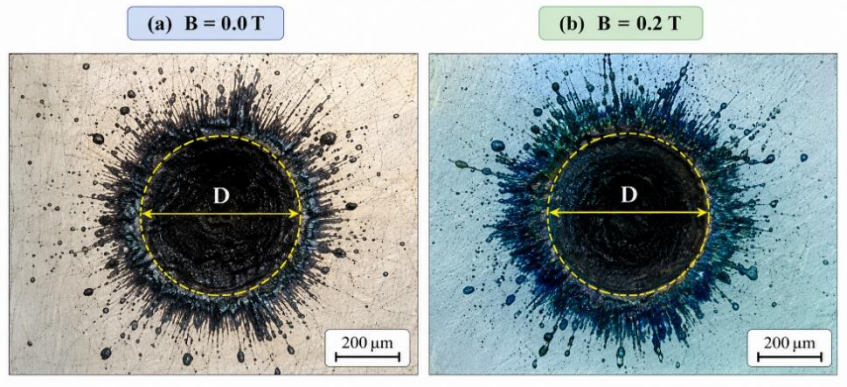
O‘lchami 20 × 20 mm² bo‘lgan mis namunasi ikkita elektromagnit qutbi orasidagi bo‘shliq markaziga joylashtirildi va ushbu bo‘shliqda 0,2 T induksiyali bir jinsli magnit maydon hosil qilindi. Avvalgi tadqiqotlarimizda boshqa manbada keltirilganidek, 14 J/cm² lazer energiyasi zichligi va 0,2 T magnit maydon induksiyasi optimal eksperimental parametrlar ekanligi aniqlangan. Shu sababli, mazkur ishda ushbu parametrlar o‘zgarmas saqlandi va magnit maydon mavjudligida impulslar soni (N) o‘zgarishining lazerli ablatsiya jarayoniga ta’siri o‘rganildi.



1-rasm. Magnit maydon mavjudligida lazerli ablatsiya jarayonining sxematik tasviri. Lazer nuri fokus masofasi 15 cm bo‘lgan qavariq linza yordamida mis nishon (ABCD) sirtiga fokuslangan

Mis namunasi turli sondagi lazer impulslari - N = 10, 30, 50, 70 va 90 bilan nurlantirildi. Magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda ablatsiya natijasida hosil bo‘lgan kraterlarning chuqurligi va diametrlarini o‘lchash uchun yuqori aniqlikdagi sirt profilometri hamda optik mikroskopdan foydalanildi. 2(a) va 2(b)-rasmlarda, mos ravishda, B = 0 va B = 0,2 T sharoitlarda 70 ta lazer impulsi ta’sirida mis sirtida hosil bo‘lgan lazerli ablatsiya kraterlarining optik mikroskop tasvirlari keltirilgan.

Lazerli burg‘ilash teshigining tomonlar nisbatini (aspect ratio) miqdoriy baholash uchun lazer ablatsiyasi natijasida hosil bo‘lgan krater diametrini aniqlash zarur. Mazkur nisbat materialning ablatsiya chegaraviy energiya zichligiga bog‘liq. Biz ablatsiya chegaraviy energiya zichligini bir impuls uchun hamda inkubatsiya koeffitsiyentini bir vaqtning o‘zida aniqlash usulini taklif qildik. Adabiyotlarda keltirilgan avvalgi tadqiqotlarda D^2 usuli keng qo‘llanilgan. Mazkur ishda esa quyidagi



2-rasm. Mis sirtida lazerli ablatsiya natijasida hosil bo‘lgan kraterlarning diametrini ko‘rsatuvchi optik mikroskop tasvirlari: (a) B = 0,0 T va (b) B = 0,2 T. Kraterlar mis sirtiga 70 ta lazer impulsi ta’sir ettirish natijasida hosil qilingan

$$D^{*2} = \left(\frac{D}{\sqrt{2}\omega_0}\right)^2$$

usulidan foydalanildi. Lazer nurining fazoviy profili Gauss taqsimotiga ega deb qabul qilinganda, lazer ablatsiyasi natijasida hosil bo‘lgan krater diametrini quyidagi munosabat orqali aniqlash mumkin:[43]

$$D = \sqrt{2}\omega_0 \left[ln\left(\frac{F}{F_{th}(N)}\right)\right]^{1/2}$$

bu yerda D - krater diametri, ω_0 - fokuslangan lazer dog‘ining radiusi, F - lazer energiyasi zichligi , F_{th} esa ablatsiyaning chegaraviy energiya zichligidir.

Ablatsiyaning chegaraviy energiya zichligi ayni bir lazer dog‘iga tushayotgan impulslar soniga bog‘liq. Impulslar soni ortishi bilan ushbu chegaraviy qiymat kamayadi va bu hodisa inkubatsiya effekti deb ataladi. Bitta impuls uchun ablatsiyaning chegaraviy energiya zichligi ko‘p impulsli ablatsiya chegarasi bilan quyidagi munosabat orqali bog‘langan:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{\xi-1}$$

bu yerda ξ - inkubatsiya koeffitsiyenti. Ushbu koeffitsiyent ablatsiyaga uchrayotgan nishonda inkubatsiya jarayonining xususiyatini belgilaydi. Agar $\xi = 0$ bo‘lsa, inkubatsiya jarayoni to‘liq kechadi; agar $\xi = 1$ bo‘lsa, inkubatsiya kuzatilmaydi. Inkubatsiya koeffitsiyenti $0 < \xi < 1$ oralig‘ida bo‘lganda materialda yumshash, $\xi > 1$ bo‘lganda esa qattiqlashish jarayoni yuz beradi. Metallarda odatda $0 < \xi < 1$ bo‘ladi.

(1) va (2) tenglamalardan:

$$D^{*2} = ln\left(\frac{F}{F_{th}(1)}\right) - (\xi - 1)lnN.$$

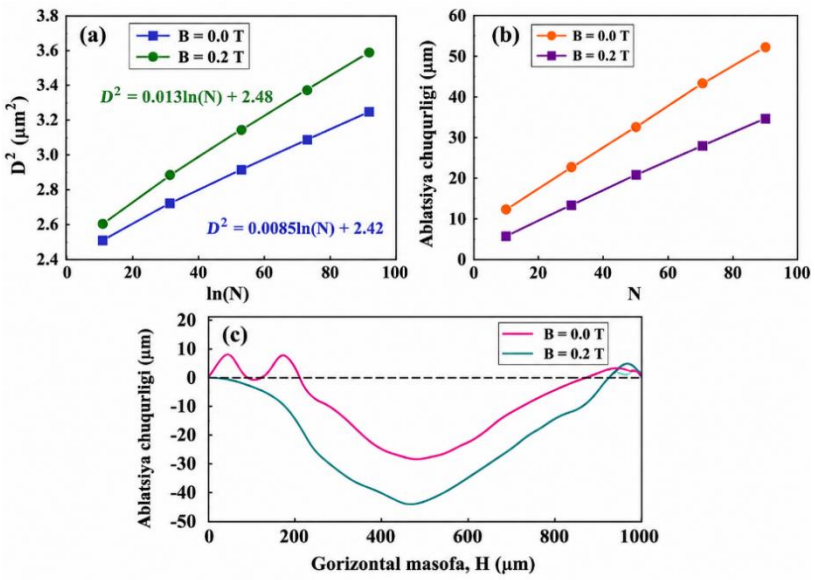
3(a)-rasmda D^{*2} kattaligining ln(N) ga bog‘liq ravishda o‘zgarishi magnit maydon mavjud bo‘lmagan (B=0,0 T) va B=0,2 T magnit maydon sharoitlarida keltirilgan. Hisoblashlarda N = 10, 30, 50, 70 va 90 impulslar soniga mos qiymatlar hisobga olindi. Magnit maydon mavjud bo‘lmagan holatda D^{*2} qiymati 2,50 dan 3,25 gacha, B=0,2 T magnit maydon ta’sirida esa 2,59 dan 3,60 gacha ortdi. Olingan natijalar D^{*2} kattaligining impulslar soni ortishi bilan deyarli chiziqli ravishda oshishini ko‘rsatdi.

3(b)-rasmga ko‘ra, impulslar soni N=10 dan N=90 gacha oshirilganda ablatsiya chuqurligi B=0,0 T sharoitida 5,5 μm dan 35,0 μm gacha, B=0,2 T magnit maydon ta’sirida esa 12,5 μm dan 52,0 μm gacha ortgan. Xususan, 70 ta impulsda ablatsiya chuqurligi magnit maydonsiz holatda 27,5 μm, B=0,2 T da esa 42,5 μm ni tashkil etgan. Bu magnit maydon qo‘llanilganda 70 impulsdagi ablatsiya chuqurligi taxminan 54,5% ga ortganini ko‘rsatadi.

Magnit maydon mavjud bo‘lmagan holatda olingan eksperimental ablatsiya chegaraviy energiya zichligi adabiyotlarda keltirilgan natijalar bilan yaxshi mos keladi.[45] Magnit maydon yoqilganda bitta impuls uchun misning ablatsiya chegaraviy energiya zichligi biroz kamayishi aniqlandi. Grafiklarning qiyalik koeffitsiyentlari inkubatsiya effektini tavsiflaydi. Magnit maydon mavjudligidagi inkubatsiya koeffitsiyenti (ξ=0,98) magnit maydonsiz holatdagiga (ξ=0,99) nisbatan biroz yuqoriroq ta’sirni ko‘rsatadi. Buning sababi shundaki, birinchi impuls ta’sirida hosil bo‘lgan g‘adir-budur sirt nurlanishning yutilishini kuchaytiradi. Harorat ortishi bilan yutilish ham ortadi. Magnit maydon mavjudligida sirtning yuqori harorati uzoqroq vaqt davomida saqlanadi. Natijada magnit maydon mavjudligida nurlanishning yutilishi yuqoriroq bo‘ladi va bu, o‘z navbatida, ablatsiya chegaraviy energiya zichligining kamayishiga olib keladi.

Biroq ushbu tadqiqotda inkubatsiya effekti avvalgi tadqiqot bilan taqqoslaganda nisbatan kichik. Tadqiqot mualliflari buni impuls davomiyligiga nisbatan issiqlik diffuziyasi vaqtining qisqaroq bo‘lishi bilan

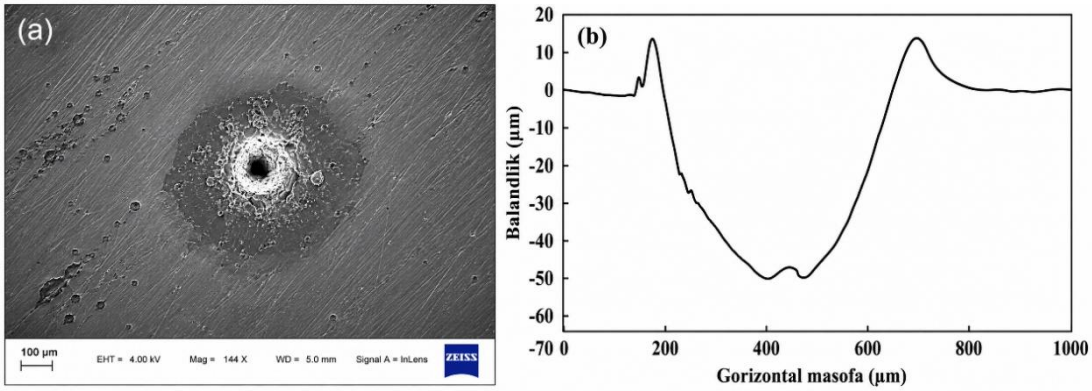
izohlaydilar. Buning yana bir sababi lazer impulslarining takrorlanish chastotasi past ekanligidir. (2)-tenglama N=10,30,50,70 va 90 uchun ablatsiya chegaraviy energiya zichligini aniqlash imkonini beradi. Masalan, N=90 bo‘lganda magnit maydon mavjud bo‘lmagan va mavjud bo‘lgan holatlar uchun ablatsiya chegaraviy energiya zichliklari mos ravishda 1,25 va 1,07 J/cm² ni tashkil qiladi. Magnit maydon mavjudligida ablatsiya chegaraviy energiya zichligi kamayadi va bu ablatsiya chuqurligining ortishiga sabab bo‘luvchi omillardan biri bo‘lishi mumkin.



3-rasm. (a) Magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda (D^2) kattaligining ln(N) ga bog‘liq o‘zgarishi. (b) Magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda ablatsiya chuqurligining impulslar soni ((N)) ga bog‘liq o‘zgarishi. (c) Magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda 70 ta lazer impulsi ta’sirida hosil bo‘lgan sirt chuqurligi profilining tahlil qilingan ko‘rinishi

Ablatsiya chegaraviy energiya zichligi ($F_{th}(N)$) aniqlangandan so‘ng, krater diametri ham (1)-tenglama yordamida hisoblandi va eksperimental o‘lchangan diametrlar bilan taqqoslandi. Masalan, N=50 uchun magnit maydon mavjud bo‘lmaganda ablatsiya chegaraviy energiya zichligi 1,25 J/cm²

($F_{th}(50)=F_{th}(1)500,99-1$), $F_{th(}1)=1,3$ J/cm², $\xi=0,99$, lazer dog‘ining radiusi $\omega_0=300$μm va lazer energiyasi zichligi F=14 J/cm² ni tashkil qiladi. Lazer dog‘ining diametri sirt profilometri va optik mikroskop yordamida eksperimental ravishda o‘lchandi va $2\omega_0=600$μm ekanligi aniqlandi. Shunga ko‘ra, (1)-tenglama yordamida hisoblangan D qiymati 675 μm, eksperimental qiymati esa 690 μm ni tashkil etdi. Magnit maydon mavjud bo‘lmagan holatda hisoblangan krater diametri eksperimental o‘lchangan qiymatga juda yaqin bo‘lib, ular orasidagi farq taxminan 9% ni tashkil qiladi.



4-rasm. Magnit maydon mavjudligida 90 ta lazer impulsi ta’sirida hosil bo‘lgan lazerli ablatsiya kraterining (a) FESEM tasviri va **(b) unga mos chuqurlik profile**

Xuddi shu tarzda magnit maydon mavjudligidagi krater diametri ham hisoblandi va uning qiymati 675 μm, eksperimental qiymati esa 690 μm ekanligi aniqlandi. 4(a) va 4(b)-rasmlarda, mos ravishda, lazer ablatsiyasi natijasida hosil bo‘lgan kraterning FESEM tasviri hamda 0,2 T magnit maydon mavjudligidagi

unga mos chuqurlik profili keltirilgan. N=90 bo‘lganda kraterning ham diametri, ham chuqurligi kamaygan (4-rasm). N qiymati 70 dan 90 gacha oshirilganda chuqurlik ham 48 μm dan 45 μm gacha biroz kamaygan. N ortishi bilan erigan qatlamning qalinligi ham ortadi. Plazmadan keladigan issiqlik oqimining ta’siri magnit maydon mavjudligida erigan qatlam qalinligini yanada oshiradi. Otilib chiqayotgan massa natijasida yuzaga keladigan qaytish bosimi (recoil pressure) erigan qatlamni krater markazidan periferik sohaga siljitadi va natijada material krater devoriga cho‘kadi. Chuqurlikning ortishi massaning kraterdan to‘liq chiqarib tashlanishiga to‘sqinlik qiladi va keyinchalik uning krater devoriga cho‘kishiga olib keladi. Natijada N=90 bo‘lganda krater diametri va chuqurligining kamayishi kuzatildi. Biroq N<90 bo‘lganda ablatsiya chuqurligi impulslar soniga bog‘liq ravishda chiziqli ravishda ortgan [3(b)-rasm].

Xulosa. Mazkur tadqiqotda magnit maydon ta’sirida plazma-sirt issiqlik almashinuvining lazerli ablatsiya jarayoniga ta’siri eksperimental va sonli usullar asosida o‘rganildi. Olingan natijalar 0,2 T magnit maydon qo‘llanilganda lazer yordamida hosil qilingan plazmaning nishon bilan o‘zaro ta’siri kuchayishi va buning natijasida ablatsiya samaradorligi sezilarli darajada ortishini ko‘rsatdi. Xususan, lazer impulslari soni 10 tadan 90 tagacha oshirilganda mis sirtidagi ablatsiya chuqurligi magnit maydonsiz sharoitda 5,5 μm dan 35,0 μm gacha, 0,2 T magnit maydon ta’sirida esa 12,5 μm dan 52,0 μm gacha ortishi aniqlandi. 70 ta lazer impulsi ta’sirida magnit maydon qo‘llanilishi ablatsiya chuqurligini magnit maydonsiz holatga nisbatan taxminan 54,5% ga oshirdi.

Magnit maydon mavjudligida misning ablatsiya chegaraviy energiya zichligining kamayishi kuzatildi. Bu holat plazmaning fazoviy cheklanishi, plazmadan nishon sirtiga uzatiladigan issiqlik oqimining ortishi hamda yuqori sirt haroratining uzoqroq vaqt saqlanishi bilan izohlanadi. Shu bilan birga, inkubatsiya effektining nisbatan kichik ekanligi aniqlanib, magnit maydon mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda inkubatsiya koeffitsiyentlari mos ravishda ξ=0,98 va ξ=0,99 qiymatlarni tashkil etdi. Tajriba natijalari asosida plazmadan nishon sirtiga issiqlik uzatilishini hisobga oluvchi sonli modelning qo‘llanilishi magnit maydon ko‘magidagi lazerli ablatsiya mexanizmini tavsiflash imkonini berdi. Hisoblangan natijalarning eksperimental ma’lumotlar bilan yaxshi mos kelishi taklif etilgan yondashuvning samaradorligini tasdiqlaydi. Shuningdek, yuqori impulslar sonida erigan qatlam qalinligining ortishi, qaytish bosimi ta’sirida materialning krater periferiyasiga ko‘chishi va qayta cho‘kishi ablatsiya chuqurligi hamda krater geometrik parametrlarining o‘zgarishida muhim rol o‘ynashi aniqlandi.

Umuman olganda, magnit maydon yordamida plazma-sirt energiya almashinuvini boshqarish metallarning lazerli ablatsiya samaradorligini oshirishning istiqbolli usuli ekanligi ko‘rsatildi. Olingan natijalar lazerli mikroishlov berish, yupqa plyonkalarni hosil qilish va materiallarga yuqori aniqlikda lazer yordamida ishlov berish jarayonlarining texnologik parametrlarini optimallashtirish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Akhmedov, M., Sadullayev, J., Vapayev, M., Matnazarov, A., Davletov, I., & Rayimbaev, J. (2025). Picosecond-pulsed laser ablation of aluminum foils: crater morphology and plasma parameters. Engineering Research Express, 7(3), 035362.

2. K. S. Singh and A. K. Sharma, “Effect of magnetic field-dependent effective thermal conductivity of melted layer on nanosecond laser ablation of copper and formation of nanoparticles at atmospheric air pressure,” J. Appl. Phys., 130(4), 043302 (2021).

3. Y.-F. Tzeng, “Process characterization of pulsed Nd:YAG laser seam welding,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., 16, 10-18 (2000).

4. K. S. Singh and A. K. Sharma, “Spatially resolved behavior of laser-produced copper plasma along expansion direction in the presence of static uniform magnetic field,” Phys. Plasmas, 30(12), 122104 (2016).

5. A. K. Aitoumeziane, A. Sari, B. Liani, and J.-D. Parisse, “Theoretical and numerical study of the interaction of a nanosecond laser pulse with a copper target for laser-induced breakdown spectroscopy applications,” J. Opt. Soc. Am. B, 31, 53-61 (2014).

6. N. A. Vasantgadkar, U. V. Bhandarkar, and S. S. Joshi, “A finite element model to predict the ablation depth in pulsed laser ablation,” Thin Solid Films, 519, 1421-1430 (2010).

7. C. Ye, G. J. Cheng, S. Tao, and B. X. Wu, “Magnetic field effects on laser drilling,” J. Manuf. Sci. Eng., 135(1-5), 061020 (2013).

8. Y. J. Chang, C. L. Kuo, and N. Y. Wang, “Magnetic assisted laser micromachining for highly reflective metals,” J. Laser Micro Nanoeng., 7(3), 254-259 (2012).

9. C.-C. Ho, G.-R. Tseng, Y.-J. Chang, J.-C. Hsu, and C.-L. Kuo, "Magnetic-field-assisted laser percussion drilling," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 73, 329-340 (2014).

10.A. Dawood, A. Dawood, A. Dawood, A. Dawood, M. A. Khan, S. Bashir, S. Bashir, A. Ayub, A. Hayat, A. Hayat, J. H. Sanderson, N. A. Chishti, and N. A. Chishti, "Examining the role of magnetic fields in plasma behavior and surface evolution of a Mg alloy with varied irradiances in a femtosecond laser treatment," Appl. Opt., 63(13), 3585-3599 (2024).

11.A. Phukan and A. Nath, "Influence of an external magnetic field on laser-induced plasma and cavitation bubbles in submerged targets," J. Laser Appl., 35(1), 12011 (2023).

12.K. Shen, Y. F. Lu, T. Gebre, H. Ling, and Y. X. Han, "Optical emission in magnetically confined laser-induced breakdown spectroscopy," J. Appl. Phys., 100(1-7), 053303 (2006).

13.Y. Li, C. H. Hu, H. Z. Zhang, Z. K. Jiang, and Z. S. Li, "Optical emission enhancement of laser-produced copper plasma under a steady magnetic field," Appl. Opt., 48, B105-B110 (2009).

14.V. N. Rai, A. K. Rai, F. Y. Yueh, and J. P. Singh, "Optical emission from laser-induced breakdown plasma of solid and liquid samples in the presence of a magnetic field," Appl. Opt., 42, 2085-2093 (2003).

15.O. Ustyugov and S. D. Ustyugov, "Simulation of radiation expansion of laser plasma in an external magnetic field," Math. Models Comput. Simul., 2, 362-374 (2010).

16.K. Pathak and A. Povitsky, "Plume dynamics and shielding characteristics of nanosecond scale multiple pulse in carbon ablation," J. Appl. Phys., 104(11), 113108 (2008).

17.K. A. Pathak and A. J. Chandy, "Laser ablated carbon plume flow dynamics under magnetic field," J. Appl. Phys., 105(8), 084909 (2009).

18.A. H. Shukor, H. A. Alhattab, and I. Takano, "Electrical and optical properties of copper oxide thin films prepared by DC magnetron sputtering," J. Vac. Sci. Technol. B, 38(1), 012803 (2020).

19.M. F. Al-Kuhaili and S. M. A. Durrani, "Optical properties of chromium oxide thin films deposited by electron-beam evaporation," Opt. Mater., 29(6), 709-713 (2007).

20.K. S. Singh and A. K. Sharma, "Effect of variation of magnetic field on laser ablation depth of copper and aluminum targets in air atmosphere," J. Appl. Phys., 119(18), 183301 (2016).

21.C. S. B. Nathala, A. Ajami, A. Husinsky, B. Farooq, S. Kudryashov, A. Daskalova, I. Bliznakova, and A. Assion, "Ultrashort laser pulse ablation of copper, silicon and gelatin: Effect of the pulse duration on the ablation thresholds and the incubation coefficients," Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process., 122(2), 107 (2016).