UO‘K 620.3:535.21:546.26

3D O‘LCHAMLI GRAFEN NANOSTRUKTURALAR SINTEZIGA LAZER VA MATERIAL PARAMETRLARINING TA’SIRI

Sadullayev Jo‘rabek Oybekovich,
Urganch davlat universiteti Elektrotexnika va energetika kafedrasi o‘qituvchisi
Sotimova Mahbuba Kadamovna,
Urganch davlat universiteti Fizika kafedrasi o‘qituvchisi
**jurabek.s@urdu.uz*

Annotatsiya. *Ushbu ishda polimid (PI) substratida lazer-induksiyalangan 3D grafen nanostrukturalarining shakllanishiga lazer va material parametrlarining ta’siri nazariy, sonli va eksperimental yondashuvlar asosida tahlil qilinadi. Lazer-polimid o‘zaro ta’siri COMSOL Multiphysics muhitida chekli elementlar usuli (FEM) asosida modellashtirilib, lazer energiyasining yutilishi, issiqlik tarqalishi va sirt haroratining fazoviy-vaqt bo‘yicha evolyutsiyasi baholandi. Modelda polimidning issiqlik o‘tkazuvchanligi, issiqlik sig‘imi, zichligi va optik yutilish koeffitsiyentining haroratga bog‘liqligi hisobga olindi. Femtosoniyali lazer uchun skanerlash tezligi 0,05-0,20 m/s oralig‘ida o‘rganilib, tezlik kamayishi bilan issiqlik to‘planishi va maksimal sirt harorati 2400 K dan 2600 K gacha ortishi aniqlandi. Shuningdek, yutilish koeffitsiyentining A = 0,7; 0,8; 0,9 qiymatlaridagi rejimlari taqqoslanib, A ≈ 0,8 holati grafen hosil bo‘lish sifati, g‘ovaklik va termik barqarorlik nuqtayi nazaridan maqbul rejim sifatida belgilandi. Olingan sonli natijalar SEM va Raman tahlillari, shuningdek, LIG ning elektr qarshiligini o‘lchash natijalari bilan bog‘lanib, lazer parametrlarini boshqarish orqali 3D grafen strukturasini maqsadli shakllantirish imkoniyati ko‘rsatildi.*

Kalit so‘zlar: *lazer-induksiyalangan grafen, 3D grafen, polimid, femtosekundali lazer, COMSOL Multiphysics, FEM, issiqlik uzatish, lazer yutilishi, skanerlash tezligi, Raman spektroskopiyasi, SEM*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРА И МАТЕРИАЛА НА СИНТЕЗ 3D ГРАФЕНОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Аннотация. *В данной работе на основе теоретического, численного и экспериментального подходов проанализировано влияние параметров лазера и материала на формирование индуцированных лазером 3D графеновых наноструктур на полиимидной (ПИ) подложке. Взаимодействие лазера с полиимидом моделировалось в среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов (МКЭ), с помощью которого были оценены поглощение лазерной энергии, распространение тепла и пространственно-временная эволюция температуры поверхности. В модели учтена температурная зависимость теплопроводности, теплоёмкости, плотности и коэффициента оптического поглощения полиимида. Для режима фемтосекундного лазера скорость сканирования исследовалась в диапазоне 0,05–0,20 м/с, при этом установлено, что снижение скорости сканирования приводит к накоплению тепла и повышению максимальной температуры поверхности с 2400 К до 2600 К. Также были сопоставлены режимы с коэффициентом поглощения A = 0,7; 0,8 и 0,9, при этом значение A ≈ 0,8 определено как оптимальный режим с точки зрения качества формирования графена, пористости и термической стабильности. Полученные численные результаты были сопоставлены с данными SEM и рамановской спектроскопии, а также с результатами измерения электрического сопротивления индуцированного лазером графена (LIG), что показало возможность целенаправленного формирования структуры 3D графена посредством управления параметрами лазера.*

Ключевые слова: *индуцированный лазером графен, 3D графен, полиимид, фемтосекундный лазер, COMSOL Multiphysics, МКЭ, теплоперенос, поглощение лазерного излучения, скорость сканирования, рамановская спектроскопия, SEM.*

INFLUENCE OF LASER AND MATERIAL PARAMETERS ON THE SYNTHESIS OF 3D GRAPHENE NANOSTRUCTURES

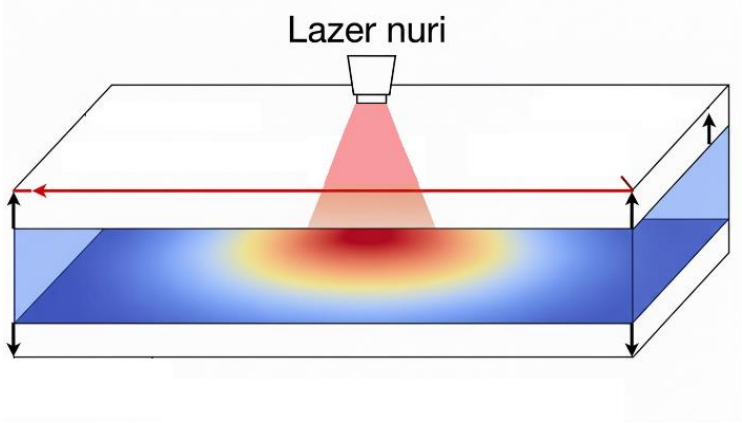
Abstract. *This study analyzes the influence of laser and material parameters on the formation of laser-induced 3D graphene nanostructures on a polyimide (PI) substrate, based on theoretical, numerical, and experimental approaches. The laser–polyimide interaction was modeled in the COMSOL Multiphysics environment using the finite element method (FEM), through which the absorption of laser energy, heat*

propagation, and the spatiotemporal evolution of the surface temperature were evaluated. The model accounted for the temperature dependence of the polyimide's thermal conductivity, heat capacity, density, and optical absorption coefficient. For the femtosecond laser regime, the scanning speed was investigated in the range of 0.05–0.20 m/s, and it was established that a decrease in scanning speed leads to heat accumulation and an increase in the maximum surface temperature from 2400 K to 2600 K. Furthermore, absorption coefficient regimes of A = 0.7, 0.8, and 0.9 were compared, and A ≈ 0.8 was identified as the optimal regime in terms of graphene formation quality, porosity, and thermal stability. The obtained numerical results were correlated with SEM and Raman analyses, as well as with electrical resistance measurements of the laser-induced graphene (LIG), demonstrating the possibility of purposefully controlling 3D graphene structure formation through laser parameters.

Keywords: *laser-induced graphene, 3D graphene, polyimide, femtosecond laser, COMSOL Multiphysics, FEM, heat transfer, laser absorption, scanning speed, Raman spectroscopy, SEM.*

Kirish. Grafen va uning uch o‘lchamli g‘ovakli nanostrukturalari yuqori elektr o‘tkazuvchanligi, katta solishtirma sirt maydoni, mexanik mustahkamligi va egiluvchanligi sababli energiya saqlash qurilmalari, sensorlar va egiluvchan elektronika uchun eng istiqbolli funksional materiallardan biri hisoblanadi. Lazer-induksiyalangan grafen (LIG) texnologiyasi polimer yuzasida grafensimon g‘ovakli strukturalarni bir bosqichda, maskasiz va to‘g‘ridan-to‘g‘ri hosil qilish imkonini beradi [1-3]. Biroq LIG sifati lazer quvvati, impuls davomiyligi, energiya zichligi, skanerlash tezligi va lazer nuri diametri bilan bir qatorda polimerning optik yutilishi va termofizik xossalariga ham kuchli bog‘liq. Bunday ko‘p parametrli, ko‘p fizikali jarayonni faqat tajriba yo‘li bilan optimallashtirish vaqt va resurs talab qiladi, shu sababli lazer-material tizimini sonli modellashtirish optimal texnologik rejimlarni oldindan aniqlashning samarali vositasiga aylanadi [4-6].

Tadqiqot usuli. Tadqiqotda polimid substratida lazer ta’sirida yuzaga keladigan termik jarayonlar COMSOL Multiphysics dasturida chekli elementlar usuli (FEM) asosida modellashtirildi. Lazer energiyasining materialda yutilishi Beer-Lambert qonuni bilan, issiqlik tarqalishi esa Furye issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi bilan tavsiflandi; lazer nurlanishi hajmiy (fs rejim) va sirt (ms rejim) issiqlik manbayi sifatida qaraldi. Modellashtirishda polimid qatlamining qalinligi 168 mkm, zichligi 1400 kg/m³ deb olindi, uning issiqlik o‘tkazuvchanligi, issiqlik sig‘imi va optik yutilish koeffitsiyentining haroratga bog‘liq empirik ifodalari (Ruan va boshqalar, 2018 asosida) hisobga olindi. Femtosoniyali lazer uchun 250 fs impuls davomiyligi, 10 kHz takrorlanish chastotasi va 100-150 mkm lazer dog‘i diametri, ayrim hisoblarda esa 100 mkJ impuls energiyasi va 0,2 m/s gacha skanerlash tezligi qo‘llanildi. Tadqiqotda SEM va Raman spektroskopiyasi, shuningdek, SMU asosidagi ikki nuqtali elektr qarshilikni o‘lchash usuli olingan sonli natijalarni eksperimental jihatdan baholash uchun qo‘llanildi.

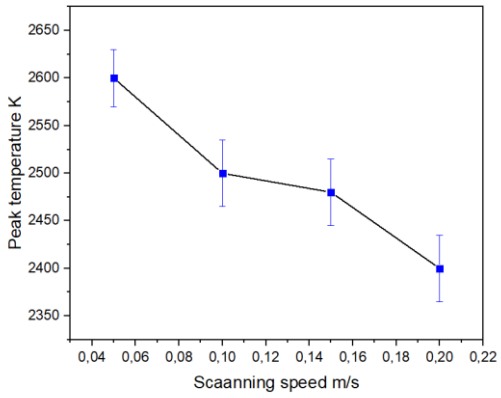


1-rasm. Lazer nurlanishining polimid sirtida issiqlik manbayi sifatida modellashtirilishining sxematik ko‘rinishi

Modelning asosiy g‘oyasi lazer energiyasini lokal issiqlik manbayi sifatida berish va uning material ichida tarqalishi natijasida yuzaga keladigan harorat maydonini aniqlashdan iborat. Bu yondashuv lazer quvvati, skanerlash tezligi va yutilish koeffitsiyentining termik ta’sir zonasiga ta’sirini miqdoriy baholash imkonini beradi.

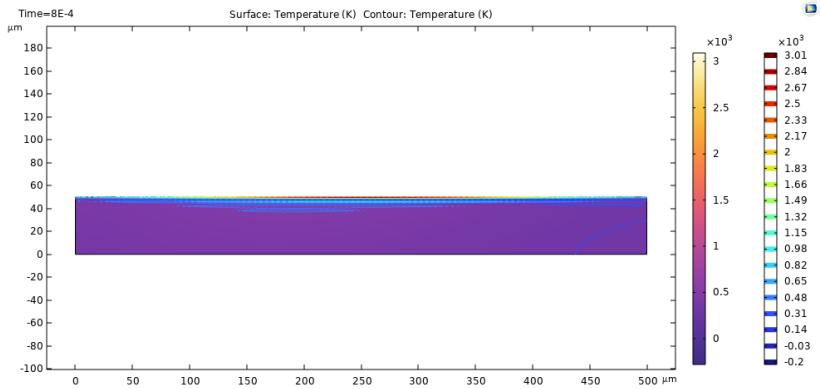
Asosiy natijalar. Vaqtga bog‘liq COMSOL simulyatsiyalari femtosoniyali lazer skanerlash tezligining harorat maydonining fazoviy va vaqtinchalik evolyutsiyasini qanday boshqarishini ko‘rsatdi: skanerlash tezligi 0,05 m/s dan 0,20 m/s gacha oshganda, yuzadagi maksimal harorat taxminan 2600 K dan 2400 K gacha muntazam ravishda pasaydi (2-rasm), oraliq nuqtalarda esa 0,10 m/s da ≈2500 K va 0,15 m/s da ≈2480 K qiymatlar qayd etildi. Bu tendensiya skanerlash tezligini LIG hosil bo‘lish jarayonining asosiy boshqaruvchi texnologik parametrlaridan biri sifatida ko‘rsatadi: past tezliklarda lazer-material o‘zaro ta’sir

vaqti uzayib, ketma-ket impulslar orasida material to‘liq sovib ulgurmaydi, natijada issiqlik kumulyativ ravishda to‘planadi va sirt harorati polimiddan olingan grafen uchun xarakterli 2500-3500 K grafitlanish oynasiga yaqinlashadi yoki unga tushadi. Yuqori skanerlash tezliklarida esa energiya to‘planishi kamayib, cho‘qqi harorat grafitlanish oynasining pastki chegarasidan pastda qoladi, bu esa nisbatan yupqaroq va nuqsonliroq grafen qatlami hosil bo‘lishiga olib keladi. Shu bilan birga, eng past tezlikda (0,05 m/s) issiqlik ta’sir zonasining kengayishi va mahalliy qizib ketish yoki ablyatsiya xavfining ortishi ham kuzatildi - demak, grafen sifati va substratning termik shikastlanishi o‘rtasida optimal texnologik oyna mavjud.



2-rasm. Skanerlash tezligining maksimal sirt haroratiga ta’siri: 0,05-0,20 m/s diapazonida Tmax ning monoton pasayish tendensiyasi

Polimidning lazer nurlanishini yutish koeffitsiyenti (A) ham alohida boshqaruvchi parametr sifatida o‘rganildi. A = 0,7 holatida yutilgan energiya miqdori ayrim zonalarda grafitlanish uchun yetarli bo‘lmay qoladi, struktura yetarlicha rivojlanmaydi. A = 0,8 da lazer energiyasining 80 foizi yutilib, karbonizatsiya va uch o‘lchamli g‘ovak grafen tarmog‘i shakllanishi uchun eng maqbul muvozanat kuzatiladi: polimer tarkibidan ajralayotgan CO, CO_2, H_2 va N_2 gazlari material ichida mikrokanallar hosil qilib, yuqori g‘ovaklikka ega, nisbatan kam nuqsonli struktura shakllanishiga xizmat qiladi. A = 0,9 da esa grafitlanish darajasi eng yuqori bo‘lsa-da, ortiqcha qizish tufayli lokal ablyatsiya va strukturaviy nuqsonlar ehtimoli oshadi. Shunga muvofiq, uzluksiz (millisekund) lazer rejimida ham 1,0 J/sm² energiya oqimida sirt harorati 2100-2200 K ga yetib, grafen hosil bo‘lishi uchun yetarli fizik sharoit yaratilishi ko‘rsatildi (3-rasm).

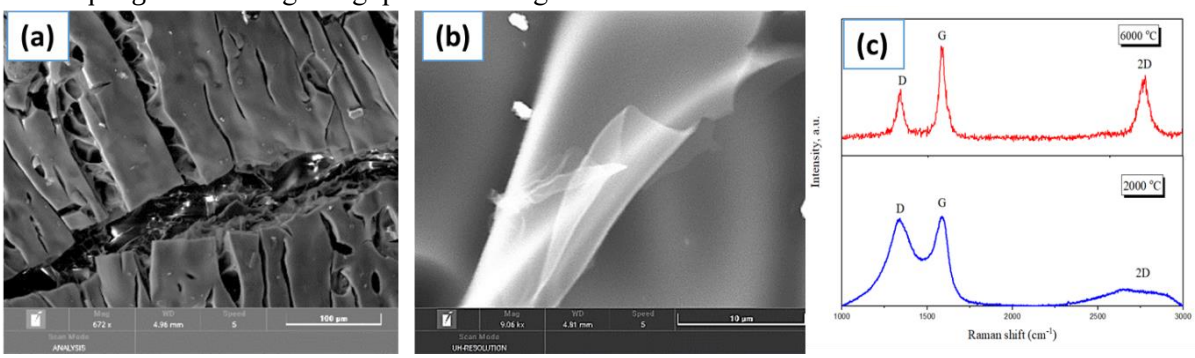


3-rasm. COMSOL Multiphysics hisoblashida lazer ta’siridagi polimid qatlamining harorat maydoni taqsimoti

Sonli modelda materialning issiqlik o‘tkazuvchanligi, issiqlik sig‘imi, zichligi va optik yutilish koeffitsiyentining haroratga bog‘liq o‘zgarishlarini hisobga olish harorat maydoni va issiqlik gradientlarini aniqroq tavsiflash imkonini berdi. Xususan, polimidning issiqlik sig‘imi harorat ~900-950 K ga yetganda maksimal qiymatga (~2080 J/(kg*K)) erishib, undan keyin pasayadi, bu esa polimidda fazaviy yoki strukturaviy o‘zgarishlarning sodir bo‘lishidan dalolat beradi. Bu esa lazer parametrlaridan kelib chiqib grafen hosil bo‘lish shartlarini oldindan baholash uchun modeldan foydalanish imkonini yaratadi.

Eksperimental tasdiq. Sonli modellashtirish natijalari SEM va Raman spektroskopiyasi bilan taqqoslangan. CO_2 va Yb:YAG lazer nurlari yordamida sintezlangan ko‘p qatlamli va bitta qatlamli LIG namunalarining SEM mikrofotosuratlarida o‘zaro bog‘langan, g‘ovakli uglerod skeleti kuzatildi, bu esa uch o‘lchamli grafen tarmog‘ining rivojlanganligini tasdiqladi. Raman spektrlarida D, G va 2D zonalarining mavjudligi grafensimon uglerod strukturasining shakllanishini tavsiqladi (4-rasm). Femtosoniyali lazer

plazmasining ~5000 K gacha yetadigan yuqori haroratiga qaramay, polimidning o‘zi bir necha yuz darajali haroratda qolishi past nuqsonli grafen qatlamini hosil qilish uchun yetarli emasligi aniqlandi; shu sababli nuqson zichligini kamaytirish uchun vakuumda (500 °C, 45 daqiqa, suyuq azot bug‘i muhitida) qo‘shimcha tavlash usuli qo‘llanildi, bu esa qiyosiy Raman tahlilida D/G nisbatining kamayishi va 2D cho‘qqisining kuchayishi orqali grafen tarmog‘ining qisman tiklanganini ko‘rsatdi.



4-rasm. CO_2 va Yb:YAG lazer nurlari yordamida sintezlangan ko‘p qatlamli (a) va bitta qatlamli (b) grafenning SEM mikrofotosurati hamda mos Raman spektrlari (c)

LIG ning elektr xossalari SMU asosidagi ikki nuqtali o‘lchash usuli (5 V ochiq zanjir kuchlanishida) yordamida baholandi. Olingan natijalarga ko‘ra, femtosoniyali lazer skanerlash sonining ortishi bilan LIG ning elektr qarshiligi izchil pasayish tendensiyasini namoyon qildi: ikki marta skanerlashda qarshilik taxminan 60 Om/sm ni tashkil etsa, to‘rt marta skanerlashda ~45 Om/sm, olti marta skanerlashda ~20 Om/sm gacha, o‘nta ketma-ket skanerlashda esa ~10 Om/sm gacha pasaydi. Bu natija qo‘shimcha skanerlashlar grafen qatlamlari orasidagi bog‘lanishni mustahkamlab, umumiy o‘tkazuvchanlikni oshirishini tasdiqlaydi. Shuningdek, 40 mm/s skanerlash tezligida ketma-ket ablyatsiyalangan chiziqlar orasidagi masofaning kamayishi ham qarshilikning pasayishiga ijobiy ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.

Xulosa. Lazer nurlanishi ta’sirida polimid substratida 3D grafen nanostrukturalarining shakllanishi lazer energiyasining yutilishi, issiqlik tarqalishi, piroliz, karbonizatsiya va grafitlanish bilan bog‘liq ko‘p fizikaviy jarayon ekanligi ko‘rsatildi. COMSOL Multiphysics asosida ishlab chiqilgan model lazer parametrlarini, xususan, skanerlash tezligi va optik yutilish koeffitsiyentini - harorat maydoni bilan bog‘lash imkonini berdi. 0,05-0,20 m/s skanerlash tezliklari uchun maksimal haroratning mos ravishda taxminan 2600-2400 K oralig‘ida o‘zgarishi aniqlandi. Yutilish koeffitsiyenti uchun A ≈ 0,8 rejimi grafen hosil bo‘lish sifati, g‘ovaklik va termik barqarorlik nuqtayi nazaridan maqbul deb baholandi. Natijalar SEM, Raman tahlillari hamda elektr qarshilikni o‘lchash natijalari bilan bog‘lanib (skanerlash soni 2 dan 10 gacha ortganda qarshilikning ~60 Om/sm dan ~10 Om/sm gacha pasayishi), lazer parametrlarini oldindan tanlash va 3D LIG sintezini boshqarish uchun ilmiy asos yaratdi.

ADABIYOTLAR:

1. H. Kumar, et al. Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. AIMS Materials Science, 2022.

2. M. Romero, et al. Three-Dimensional (3D) Laser-Induced Graphene: Structure, Properties, and Application to Chemical Sensing. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021.

3. S. Chen, et al. Laser-Induced Graphene for Bioelectronics and Soft Actuators. Advanced Functional Materials, 2021.

4. X. Liu, et al. Laser-Induced Graphene Structures: From Synthesis and Applications to Future Prospects. Materials Today, 2023.

5. R. Murray, et al. Design of Experiments and Optimization of Laser-Induced Graphene. ACS Omega, 2021.

6. X. Ruan, R. Wang, J. Luo, Y. Yao, T. Liu. Experimental and Theoretical Study of Thermal Properties of Polyimide. Materials & Design, 2018.