NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

UDK: 621.373.826:535.417:681.7.069

FEMTOSEKUNDLI LAZER IMPULSLARINI SHAKLLANTIRISH USULLARI: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR

Ziyodullayev Bekzod Ilxom o‘ g‘ li
O‘ zekiston Milliy Universiteti magistranti
E-mail: bekzodforedu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-2148-5671
Ibroximov Shohijaxon Alisherxon o‘ g‘ li
Qarshi davlat Universiteti magistranti
E-mail: mr.shohfizik@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-7430-2677

Annotatsiya. *Maqolada femtosekundli lazer impulslarini shakllantirishning zamonaviy usullari tizimli tahlil qilingan. Impuls parametrlarini boshqarishning to‘ rt bosqichi — rezonator ichida generatsiya, chirplangan impulslarni kuchaytirish (CPA/OPCPA), chiziqli dispersiyani boshqarish va nochiziqli post-kompressiya — yagona texnologik zanjir sifatida ko‘ rib chiqilgan. Dasturlanadigan shakllantirish vositalari (4f-Furye sxemasi, suyuq kristalli fazoviy yorug‘ lik modulyatorlari, akustooptik dasturlanadigan dispersion filtrlar, deformatsiyalanuvchi ko‘ zgular) qiyosiy baholangan. Bo‘ shliqli tolalar va ko‘ p o‘ tishli kameralar yordamida bir necha tebranish davriga teng impulslarni yuqori o‘ rtacha quvvatda olish yo‘ nalishi yoritilgan. Adaptiv teskari aloqali optimallashtirish va neyron tarmoqlar asosidagi intellektual boshqaruv, fazoviy-vaqtinchalik shakllantirish hamda burst rejimlari zamonaviy tendensiyalar sifatida tahlil qilingan. Impulslarni diagnostika qilish usullari umumlashtirilib, sohaning asosiy cheklovlari va istiqbolli yo‘ nalishlari asoslab berilgan.*

Kalit so‘ zlar: *femtosekundli impuls, impulsni shakllantirish, chirplangan impulsni kuchaytirish, dispersiyani boshqarish, ko‘ p o‘ tishli kamera, fazoviy yorug‘ lik modulyatori, akustooptik dispersion filtr, adaptiv optimallashtirish, few-cycle impuls, tashuvchi-o‘ rov fazasi.*

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ

Аннотация. *В статье систематически проанализированы современные методы формирования фемтосекундных лазерных импульсов. Четыре этапа управления параметрами импульса — внутрирезонаторная генерация, усиление чирпированных импульсов (CPA/OPCPA), линейное управление дисперсией и нелинейная посткомпрессия — рассмотрены как единая технологическая цепочка. Сравнительно оценены программируемые средства формирования (4f-схема Фурье, жидкокристаллические пространственные модуляторы света, акустооптические программируемые дисперсионные фильтры, деформируемые зеркала). Освещено направление получения импульсов длительностью в несколько периодов колебаний при высокой средней мощности с помощью полых волокон и многопроходных ячеек. Проанализированы адаптивная оптимизация с обратной связью и интеллектуальное управление на основе нейронных сетей, пространственно-временное формирование и burst-режимы. Обобщены методы диагностики импульсов, обоснованы основные ограничения и перспективные направления развития области.*

Ключевые слова: *фемтосекундный импульс, формирование импульса, усиление чирпированных импульсов, управление дисперсией, многопроходная ячейка, пространственный модулятор света, акустооптический дисперсионный фильтр, адаптивная оптимизация, few-cycle импульс, фаза огибающей относительно несущей.*

METHODS OF FEMTOSECOND LASER PULSE SHAPING: MODERN APPROACHES

Abstract. *The paper systematically analyses modern methods for shaping femtosecond laser pulses. Four stages of pulse-parameter control — intracavity generation, chirped-pulse amplification (CPA/OPCPA), linear dispersion management and nonlinear post-compression — are treated as a single technological chain. Programmable shaping tools (the 4f Fourier arrangement, liquid-crystal*

spatial light modulators, acousto-optic programmable dispersive filters, deformable mirrors) are compared. The generation of few-cycle pulses at high average power using hollow-core fibres and multipass cells is discussed. Adaptive feedback optimisation and neural-network-based intelligent control, spatiotemporal shaping and burst regimes are analysed as current trends. Pulse characterisation methods are summarised, and the principal limitations and promising directions of the field are substantiated.

Keywords: *femtosecond pulse, pulse shaping, chirped pulse amplification, dispersion management, multipass cell, spatial light modulator, acousto-optic dispersive filter, adaptive optimisation, few-cycle pulse, carrier-envelope phase.*

KIRISH

Femtosekundli (1 fs = 10^{-15} s) davomiylikdagi lazer impulslari zamonaviy fizik eksperimentning eng kuchli vositalaridan biriga aylandi. Ularning ikki xususiyati noyob imkoniyatlarni belgilaydi: energiyaning o‘ ta qisqa vaqt oralig‘ ida jamlanishi tufayli nisbatan kichik energiyada ham 10^{13}–10^{20} Vt/sm² tartibidagi nurlanish zichligiga erishiladi; impuls davomiyligi esa atom va molekulalardagi tebranish (10–100 fs) hamda elektron (100 as – 1 fs) jarayonlari vaqt shkalasi bilan taqqoslanadi.

Biroq ko‘ pchilik masalada impulsning shunchaki qisqa bo‘ lishi yetarli emas — uning vaqt-chastota profilini maqsadli boshqarish talab etiladi. Spektral amplituda va, ayniqsa, spektral faza ustidan nazorat o‘ rnatish “impulsni shakllantirish” (pulse shaping) deb ataladigan mustaqil yo‘ nalishning predmetini tashkil etadi[1]. Masala quyidagicha qo‘ yiladi: kirishdagi maydonning spektral tasviriga $H(\omega) = A(\omega)\cdot\exp[i\varphi(\omega)]$ kompleks uzatish funksiyasi qo‘ llaniladi. Spektral fazani markaziy chastota atrofida qatorga yoyish orqali guruh kechikishi, guruh kechikishi dispersiyasi (GDD), uchinchi (TOD) va yuqori tartibli hadlar ajratiladi; aynan shu koeffitsientlarni boshqarish shakllantirishning fizik mazmunini tashkil etadi.

Sohaning rivojlanishida bir necha hal qiluvchi bosqich ajratiladi: 1985-yilda taklif etilgan chirplangan impulslarni kuchaytirish (CPA) usuli o‘ ta yuqori quvvatli impulslarni olish yo‘ lidagi asosiy to‘ siqni bartaraf etdi[2] va 2018-yilgi Nobel mukofoti bilan taqdirlandi; 1990-yillarda dasturlanadigan shaperlar paydo bo‘ ldi[3]; 2000-yillarda few-cycle impulslar amaliyotga kirdi; so‘ nggi o‘ n yillikda esa yuqori o‘ rtacha quvvatli tizimlar, ko‘ p o‘ tishli kameralar va sun’iy intellekt asosidagi adaptiv boshqaruv sohaning yangi qiyofasini shakllantirdi. **Tadqiqotning maqsadi** — femtosekundli impulslarni shakllantirish usullarini yagona tizimda tasniflash, ularning fizik asoslari va cheklovlarini qiyosiy tahlil qilish hamda 2020–2026 yillardagi asosiy tendensiyalarni aniqlashdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA TADQIQOT METODOLOGIYASI

Sohaning uslubiy poydevori klassik ishlarda qo‘ yilgan: difraksion panjaralar yordamida impulsni siqish g‘ oyasi E. Treacy tomonidan asoslangan[4], prizmali kompressorlarning manfiy dispersiyali sxemasi R. Fork, O. Martinez va J. Gordon ishlarida ishlab chiqilgan[5], chirplangan ko‘ p qatlamli qoplamalar kontseptsiyasi R. Szipőcs va F. Krausz guruhlari tomonidan taklif etilgan[6]. Bo‘ shliqli tola yordamida spektrni kengaytirish va keyingi siqish usuli M. Nisoli, S. De Silvestri va O. Svelto tomonidan amalga oshirilgan[7], teskari aloqali adaptiv boshqaruv esa A. Assion va G. Gerber guruhlari tomonidan kimyoviy reaksiyalarni boshqarishda eksperimental tasdiqlangan[8].

Tadqiqot metodologiyasi tizimli adabiyotlar sharhi prinsiplariga asoslanadi. Web of Science, Scopus, Optica Publishing Group, IEEE Xplore, Springer Nature va Nature Portfolio resurslari bo‘ yicha “femtosecond pulse shaping”, “pulse compression”, “multipass cell”, “chirped pulse amplification”, “spatiotemporal light shaping” kalit so‘ zlari bo‘ yicha 2015–2026 yillarga oid nashrlar tanlab olindi. Saralash mezonlari: manbaning retsenziyalanadigan xalqaro jurnalda chop etilganligi; usulning fizik mexanizmiga yoki texnik amalga oshirilishiga printsipial yangilik kiritilganligi; impuls davomiyligi, energiyasi va o‘ rtacha quvvati bo‘ yicha miqdoriy natijalarning keltirilganligi. Materiallar qiyosiy tahlil, tizimli-strukturaviy yondashuv va umumlashtirish usullari yordamida qayta ishlandi.

TAHLIL VA NATIJALAR

Shakllantirishning umumiy sxemasi va tasnifi

Zamonaviy femtosekundli tizimda impuls shakli bir joyda emas, ketma-ket to‘ rt bosqichda shakllanadi: rezonator ichida rejimlarni sinxronlash orqali dastlabki impulsni yaratish; kuchaytirish, bunda impuls avval cho‘ ziladi,

[1] Weiner A.M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // Review of Scientific Instruments. — 2000. — Vol. 71, No. 5. — P. 1929–1960.
[2] Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Optics Communications. — 1985. — Vol. 56, No. 3. — P. 219–221.
[3] Weiner A.M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review // Optics Communications. — 2011. — Vol. 284, No. 15. — P. 3669–3692.
[4] Treacy E.B. Optical pulse compression with diffraction gratings // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1969. — Vol. QE-5, No. 9. — P. 454–458.
[5] Fork R.L., Martinez O.E., Gordon J.P. Negative dispersion using pairs of prisms // Optics Letters. — 1984. — Vol. 9, No. 5. — P. 150–152.
[6] Szipőcs R., Ferencz K., Spielmann C., Krausz F. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers // Optics Letters. — 1994. — Vol. 19, No. 3. — P. 201–203.
[7] Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique // Applied Physics Letters. — 1996. — Vol. 68, No. 20. — P. 2793–2795.
[8] Assion A., Baumert T., Bergt M., Brixner T., Kiefer B., Seyfried V., Strehle M., Gerber G. Control of chemical reactions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses // Science. — 1998. — Vol. 282, No. 5390. — P. 919–922.

kuchaytiriladi va qayta siqiladi; chiziqli dispersiyani boshqarish; nochiziqli post-kompressiya. Ushbu bosqichlar ustiga ko‘ ndalang qatlam sifatida dasturlanadigan shakllantirish va adaptiv boshqaruv qo‘ shiladi. Fizik jihatdan barcha usullar ikki sinfga bo‘ linadi: chiziqli usullar (spektr o‘ zgarmaydi, faqat spektral faza va amplituda qayta taqsimlanadi) va nochiziqli usullar (yangi spektral komponentalar hosil bo‘ ladi). Chiziqli usullar impulsni chegaraviy qiymatdan qisqa qila olmaydi — buning yagona yo‘ li spektrni kengaytirishdir.

Rezonator ichida shakllantirish

Femtosekundli impulsning “tug‘ ilish joyi” — rejimlari sinxronlangan lazer rezonatori. Passiv sinxronlashning eng keng tarqalgan mexanizmi — Kerr linzasi asosidagi sinxronlash (KLM), bunda muhitning nochiziqli sindirish ko‘ rsatkichi hisobiga yuqori intensivlikdagi nurlanish uchun qo‘ shimcha fokuslanish yuzaga keladi va rezonator yo‘ qotishlari kamayadi. Ikkinchi yondashuv — yarimo‘ tkazgichli to‘ yinuvchi yutuvchi ko‘ zgular (SESAM), bu esa sinxronlashning o‘ z-o‘ zidan boshlanishini ta’minlaydi[9]. Tolali lazerlarda impuls dispersiya, nochiziqlik, kuchayish va yo‘ qotishlar muvozanatidan hosil bo‘ ladi; rezonator dispersiyasiga qarab soliton, cho‘ zilgan impuls, similariton va dissipativ soliton rejimlari ajratiladi. Yb-tolali tizimlarda 50–200 fs, Er-tolali tizimlarda 60–150 fs davomiylik odatiy; Ti:sapfir lazerlari esa 5–10 fs qiymatlarni bevosita rezonatordan olish imkonini beradi.

Kuchaytirish bosqichida shakllantirish: CPA va OPCPA

Energiyani oshirishdagi asosiy to‘ siq — kuchaytiruvchi muhitdagi optik buzilish va o‘ z-o‘ zidan fokuslanish. CPA usuli buni uch bosqichli sxema bilan hal etadi: impuls cho‘ zgich yordamida 10^3–10^5 marta uzaytiriladi, xavfsiz cho‘ qqi quvvatida kuchaytiriladi va kompressor yordamida qayta siqiladi. Usulning muhim cheklovi — kuchayish polosasining torayishi (gain narrowing): muhit spektrning markaziy qismini kuchliroq kuchaytiradi, natijada chiqishdagi impuls uzunroq bo‘ lib qoladi. Buni kompensatsiya qilish uchun spektral filtrlar va akustooptik dasturlanadigan dispersion filtrlar qo‘ llaniladi.

Muqobil yechim — optik parametrik chirplangan impulslarni kuchaytirish (OPCPA), bunda kuchayish nochiziqli kristalldagi parametrik o‘ zaro ta’sir hisobiga sodir bo‘ ladi; kuchayish polosasi juda keng, issiqlik yuklamasi esa minimal qoladi. Yupqa diskli Yb:YAG lazerlari bilan nasoslanadigan OPCPA tizimlari few-cycle impulslarda teravatt darajasidagi cho‘ qqi quvvatini namoyish etgan[10].

Chiziqli dispersiyani boshqarish

Panjarali kompressorlar katta manfiy GDD beradi va yuqori energiyali tizimlarda ajralmas, biroq hajmli va yo‘ qotishlari nisbatan katta. Prizmali kompressorlar ixcham va kam yo‘ qotishli, lekin dispersiya kattaligi cheklangan. Grism kombinatsiyasi GDD va TOD ni mustaqil sozlash imkonini beradi. Chirplangan ko‘ zgularda turli to‘ lqin uzunliklari qoplamaning turli chuqurligidan qaytadi va nazorat qilinadigan dispersiya hosil bo‘ ladi; ixchamligi, kam yo‘ qotishi va ultra keng polosasi tufayli ular few-cycle texnikasining asosiy elementiga aylandi. Qoldiq dispersiya tebranishlarini bartaraf etish uchun juftlangan ko‘ zgular va shishali xanjarlar tizimi qo‘ llaniladi.

1-jadval. Dispersiyani boshqarish elementlarining qiyosiy tavsifi

Element	GDD diapazoni	Yuqori tartibli hadlar	Samaradorlik	Asosiy qo‘ llanilishi
Panjarali kompressor	10^4–10^6 fs^2	Cheklangan	60–80 %	CPA, yuqori energiya
Prizmali kompressor	10^2–10^3 fs^2	Cheklangan	90–95 %	Rezonator ichida
Grism	Katta	GDD va TOD mustaqil	50–70 %	Tolali CPA
Chirplangan ko‘ zgu	−20…−250 fs^2 (diskret)	Loyihalash orqali	>99 %	Few-cycle texnika
Shishali xanjar	Uzluksiz, kichik	Yo‘ q	>99 %	Nozik sozlash
AOPDF (Dazzler)	Sozlanuvchi	To‘ liq dasturlanadi	10–40 %	CPA ichida korreksiya

Nochiziqli post-kompressiya

Impulsni chegaraviy qiymatdan qisqartirish uchun spektrni kengaytirish zarur. Asosiy mexanizm — o‘ z-o‘ zidan faza modulyatsiyasi (SPM): yuqori intensivlikdagi impuls muhitning sindirish ko‘ rsatkichini o‘ zgartiradi, o‘ z fazasini

[9] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers // Nature. — 2003. — Vol. 424, No. 6950. — P. 831–838.

[10] Thin-disk laser-pumped OPCPA system delivering 4.4 TW few-cycle pulses // Optics Express. — 2020. — Vol. 28, No. 23. — P. 34574–34585.

modulyatsiya qiladi va yangi chastota komponentalari paydo bo‘ ladi; kengaygan spektr keyin chirplangan ko‘ zgular bilan siqiladi. Birinchi keng tarqalgan yechim — gaz bilan to‘ ldirilgan bo‘ shliqli tolalar (HCF), ular 5 fs dan qisqa impulslarni olish imkonini bergan[11], biroq kirish energiyasi bo‘ yicha tor ish oynasi va o‘ rtacha quvvat bo‘ yicha cheklovlarga ega.

So‘ nggi o‘ n yillikda ustunlikni ko‘ p o‘ tishli kameralar (multipass cell, MPC) egalladi. MPC — Errit tipidagi ikki sferik ko‘ zguli tizim bo‘ lib, impuls unda o‘ nlab marta aylanadi va har bir o‘ tishda nochiziqli fazaning kichik ulushini to‘ playdi. Nochiziqlikning ko‘ p o‘ tishlar bo‘ ylab taqsimlanishi tufayli fazoviy-spektral bir jinslilik saqlanadi va nur sifati deyarli o‘ zgarmaydi; shu tariqa yuqori o‘ rtacha quvvatda few-cycle impulslarni olish namoyish etilgan[12]. Uchinchi yondashuv — yupqa plastinkalar ketma-ketligi: o‘ ta sodda va arzon, biroq yuqori energiyalarda nurning fazoviy bir jinsliligini saqlash qiyinlashadi.

Dasturlanadigan shakllantirish vositalari

Impuls shaklini ixtiyoriy va qayta dasturlanadigan tarzda boshqarishning asosiy vositasi — 4f-Furye sxemasi: panjara spektrni fazoda yoyadi, linza spektral komponentalarni Furye tekisligiga fokuslaydi, u yerdagi modulyator har bir komponentaning amplitudasi va fazasini mustaqil o‘ zgartiradi, so‘ ng simmetrik ikkinchi yarim spektrni qayta yig‘ adi[13]. Suyuq kristalli modulyatorlar (LC-SLM) amplituda va fazani mustaqil boshqaradi, yuqori fazoviy ruxsatga ega, ammo sekin yangilanadi. Akustooptik modulyator asosidagi shaperlar impulsdan impulsga (kHz–MHz) qayta dasturlanadi. Akustooptik dasturlanadigan dispersion filtr (AOPDF, “Dazzler”) 4f-sxemani umuman talab qilmaydi: to‘ lqin uzunligiga bog‘ liq kechikish kollinear akustooptik o‘ zaro ta’sir hisobiga kristall ichida hosil qilinadi[14]; ixchamligi tufayli u yuqori quvvatli tizimlarda standart vositaga aylangan. Deformatsiyalanuvchi ko‘ zgular esa yutilish yo‘ qotishlari deyarli nolga teng bo‘ lgani uchun yuqori quvvatli nurlarda afzalroq. Muhim yangi yo‘ nalish — shakllantirish elementlarini integral fotonika platformasiga (kremniy nitridi, lityum niobati) ko‘ chirish.

2-jadval. Dasturlanadigan shakllantirish vositalarining qiyosiy tavsifi

Vosita	Boshqariladigan parametr	Yangilanish tezligi	Kanallar soni	Asosiy cheklovi
LC-SLM	Amplituda va faza	10–100 Hz	640–1920	Sekin, quvvat chegarasi
AOM (4f ichida)	Amplituda va faza	kHz–MHz	~10^3	Samaradorlik past
AOPDF (Dazzler)	Amplituda, faza, kechikish	kHz	Uzluksiz	Uzatish koeffitsienti past
Deformatsiyalanuvchi ko‘ zgu	Faqat faza	~kHz	19–100	Faqat silliq profillar
Integral fotonik shaper	Faza, spektral filtr	MHz–GHz	O‘ nlab	Quvvat va polosa chegarasi

Adaptiv boshqaruv va sun’iy intellekt

Ko‘ p hollarda kerakli impuls shaklini oldindan analitik hisoblash mumkin emas: tizimdagi dispersiya to‘ liq ma’lum bo‘ lmaydi, o‘ rganilayotgan jarayonning javob funksiyasi esa murakkab. Bunday sharoitda teskari aloqali adaptiv optimallashtirish qo‘ llaniladi: shaper parametrlari o‘ zgartiriladi, eksperimental signal o‘ lchanadi va algoritm keyingi qadamni belgilaydi. An’anaviy ravishda genetik va evolyutsion algoritmlar ishlatilgan[15]. So‘ nggi besh yilda bu yondashuv mashinaviy o‘ qitish vositalari bilan boyitildi: Bayes optimallashtirish qimmat eksperimental o‘ lchovlar sonini bir necha barobar kamaytiradi, chuqur neyron tarmoqlar esa lazer tizimining “raqamli egizagi”ni tuzib, shaper parametrlaridan chiqish impulsiga o‘ tish funksiyasini bashorat qiladi. Tolali lazerlarda sun’iy intellekt rejimlarni sinxronlashni avtomatik topish va impuls barqarorligini ushlab turish uchun qo‘ llanilmoqda[16].

[11] Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique // Applied Physics Letters. — 1996. — Vol. 68, No. 20. — P. 2793–2795.

[12] Multipass cell for high-power few-cycle compression // Optics Letters. — 2021. — Vol. 46, No. 11. — P. 2678–2681.

[13] Weiner A.M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review // Optics Communications. — 2011. — Vol. 284, No. 15. — P. 3669–3692.

[14] Verluise F., Laude V., Cheng Z., Spielmann Ch., Tournois P. Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter // Optics Letters. — 2000. — Vol. 25, No. 8. — P. 575–577.

[15] Assion A., Baumert T., Bergt M., Brixner T., Kiefer B., Seyfried V., Strehle M., Gerber G. Control of chemical reactions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses // Science. — 1998. — Vol. 282, No. 5390. — P. 919–922.

[16] Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect // PhotoniX. — 2022. — Vol. 3. — Art. 16. — DOI: 10.1186/s43074-022-00055-3.

Fazoviy-vaqtinchalik shakllantirish va burst rejimlari

Klassik shakllantirish faqat vaqt-chastota o‘ lchovida ishlaydi. So‘ nggi yillardagi eng yorqin tendensiyalardan biri — vaqt va fazoni birgalikda, ya’ni to‘ rt o‘ lchovli E(x, y, z, t) maydon sifatida boshqarish. Fazoviy modulyatorlarning shaper bilan birlashtirilishi materiallarni ishlashda nur profilini dinamik o‘ zgartirish imkonini bermoqda[17]. Ushbu yo‘ nalishda fazoviy-vaqtinchalik optik girdoblar (STOV), “uchuvchi fokus” va “yorug‘ lik prujinasi” kabi yangi obyektlar shakllantirildi; yagona ultratez impulsni ixtiyoriy fazoviy-vaqtinchalik tasvirga aylantirish imkoniyati namoyish etilgan[18].

Amaliy texnologiyalarda ko‘ pincha bitta impulsning shakli emas, balki impulslar ketma-ketligining vaqt tuzilishi hal qiluvchi ahamiyatga ega. “Ablatsiyaviy sovitish” kontseptsiyasiga ko‘ ra, impulslar orasidagi interval issiqlikning diffuziya vaqtidan qisqa bo‘ lsa, materialdan modda olib chiqish samaradorligi keskin ortadi[19]. Shu asosda GHz-burst rejimi, keyinchalik esa MHz-burstlar ichiga joylashtirilgan GHz-burstlardan iborat “BiBurst” sxemasi shakllantirilib, ablatsiya samaradorligining bir necha barobar ortishi ko‘ rsatildi.

Shakllangan impulslarni diagnostika qilish

Davomiyligi femtosekund tartibidagi signal uchun undan qisqaroq mustaqil etalon mavjud emas, shu bois impuls o‘ zini-o‘ zi o‘ lchash prinsipiga tayaniladi. Intensivlik avtokorrelyatsiyasi faqat taxminiy davomiylikni beradi. Chastota bo‘ yicha ruxsatlangan optik kirishlash (FROG) spektrogramma qayd etib, iterativ algoritm yordamida amplituda va fazani tiklaydi[20]; spektral faza interferometriyasi (SPIDER) fazani iteratsiyasiz tiklaydi. Few-cycle diapazonida d-skan usuli keng tarqaldi: shishali xanjar surilganda kiritilayotgan dispersiya o‘ zgaradi va ikkinchi garmonika spektrining shu o‘ zgarishga bog‘ liq xaritasi qayd etiladi, bu esa siqish va o‘ lchashni bir vaqtda amalga oshirish imkonini beradi[21]. Few-cycle impulslar uchun tashuvchi to‘ lqin va o‘ rov o‘ rtasidagi faza (CEP) mustaqil fizik parametrga aylanadi va uni f–2f interferometriyasi hamda teskari aloqali halqalar yordamida barqarorlashtirish talab etiladi.

Asosiy muammolar va istiqbollar

Keng polosali tizimlarda to‘ rtinchi va undan yuqori tartibli dispersiya hadlarini to‘ liq kompensatsiya qilish qiyin; yechim — maxsus loyihalangan ko‘ zgu juftliklari va AOPDF bilan gibrid sxemalar. Dasturlanadigan shaperlar yuqori o‘ rtacha quvvatda issiqlik yuklamasi va shikastlanish chegarasi bilan cheklanadi, shu bois butunlay aks ettiruvchi sxemalar istiqbolli hisoblanadi. Impuls jabhasining qiyshayishi, fazoviy chirp va burchak dispersiyasi kabi fazoviy-vaqtinchalik bog‘ lanishlar (STC) fokusdagi haqiqiy intensivlikni sezilarli pasaytiradi va ko‘ p o‘ lchovli diagnostikani talab qiladi. Nihoyat, impuls parametrlarini o‘ lchash va e’lon qilishning yagona metrologik bazasi hali to‘ liq shakllanmagan, bu esa turli laboratoriyalar natijalarini taqqoslashni qiyinlashtiradi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Birinchidan, femtosekundli impulsni shakllantirishni alohida qurilma emas, balki generatsiya, kuchaytirish, dispersiyani boshqarish va nochiziqli post-kompressiyani qamrab oluvchi yagona texnologik zanjir sifatida ko‘ rish metodologik jihatdan to‘ g‘ ri yondashuv hisoblanadi; har bir bosqichning hissasi spektral fazaning tegishli tartibli hadlari orqali miqdoriy ifodalanadi.

Ikkinchidan, chiziqli usullar impulsni chegaraviy qiymatdan qisqartira olmaydi; bu chegarani yengishning yagona yo‘ li — nochiziqli spektral kengaytirish. Ushbu sohada ko‘ p o‘ tishli kameralar bo‘ shliqli tolalarni siqib chiqarmoqda, chunki ular yuqori uzatish koeffitsienti, yaxshi nur sifati va yuqori o‘ rtacha quvvatga chidamlilikni birlashtiradi.

Uchinchidan, dasturlanadigan vositalar orasida vazifalar taqsimoti aniq shakllangan: LC-SLM eng moslashuvchan laboratoriya vositasi, AOPDF esa kuchaytirish zanjiriga integratsiya qilinadigan sanoat standarti sifatida qaror topgan.

To‘ rtinchidan, sohaning eng kuchli zamonaviy tendensiyasi — sun’iy intellektning shakllantirish jarayoniga kirib kelishi hamda shakllantirish predmetining vaqt o‘ lchovidan to‘ rt o‘ lchovli fazoviy-vaqtinchalik maydonga kengayishi.

Takliflar: femtosekundli tizimlarni loyihalashda cho‘ zgich, kuchaytirgich, kompressor va post-kompressor dispersiyasini yagona optimallashtirish masalasi sifatida birgalikda modellashtirish tavsiya etiladi; impuls diagnostikasini shakllantirish konturiga real vaqt teskari aloqasi sifatida kiritish tizim barqarorligini oshirishning eng samarali yo‘ li hisoblanadi; O‘ zbekiston sharoitida ushbu texnologiyalarni joriy etishning eng istiqbolli yo‘ nalishlari — mikroelektronika va quyosh energetikasi materiallariga pretsizion ishlov berish, ultratez spektroskopiya asosidagi diagnostika hamda optik telekommunikatsiya komponentlarini sinovdan o‘ tkazish; mutaxassislar tayyorlashda nochiziqli optika, lazer texnikasi va hisoblash optimallashtirish usullarini birlashtirgan integrallashgan o‘ quv modullarini joriy etish maqsadga muvofiq.

---

[17] Dynamic spatial beam shaping for ultrafast laser processing: a review // Opto-Electronic Science. — 2025. — Vol. 4. — Art. 250002.

[18] Wu Y. et al. Single ultrafast pulses shaped to spatiotemporal images // Laser & Photonics Reviews. — 2025. — DOI: 10.1002/lpor.202402238.

[19] Kerse C., Kalaycıoğlu H., Elahi P. et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses // Nature. — 2016. — Vol. 537, No. 7618. — P. 84–88.

[20] Trebino R., DeLong K.W., Fittinghoff D.N., Sweetser J.N., Krumbügel M.A., Richman B.A., Kane D.J. Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating // Review of Scientific Instruments. — 1997. — Vol. 68, No. 9. — P. 3277–3295.

[21] Miranda M., Fordell T., Arnold C., L’Huillier A., Crespo H. Simultaneous compression and characterization of ultrashort laser pulses using chirped mirrors and glass wedges // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, No. 1. — P. 688–697.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘ YXATI

1. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Optics Communications. — 1985. — Vol. 56, No. 3. — P. 219–221.

2. Treacy E.B. Optical pulse compression with diffraction gratings // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1969. — Vol. QE-5, No. 9. — P. 454–458.

3. Fork R.L., Martinez O.E., Gordon J.P. Negative dispersion using pairs of prisms // Optics Letters. — 1984. — Vol. 9, No. 5. — P. 150–152.

4. Szipőcs R., Ferencz K., Spielmann C., Krausz F. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers // Optics Letters. — 1994. — Vol. 19, No. 3. — P. 201–203.

5. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique // Applied Physics Letters. — 1996. — Vol. 68, No. 20. — P. 2793–2795.

6. Weiner A.M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // Review of Scientific Instruments. — 2000. — Vol. 71, No. 5. — P. 1929–1960.

7. Weiner A.M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review // Optics Communications. — 2011. — Vol. 284, No. 15. — P. 3669–3692.

8. Verluise F., Laude V., Cheng Z., Spielmann Ch., Tournois P. Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter // Optics Letters. — 2000. — Vol. 25, No. 8. — P. 575–577.

9. Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers // Nature. — 2003. — Vol. 424, No. 6950. — P. 831–838.

10. Assion A., Baumert T., Bergt M., Brixner T., Kiefer B., Seyfried V., Strehle M., Gerber G. Control of chemical reactions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses // Science. — 1998. — Vol. 282, No. 5390. — P. 919–922.

11. Trebino R., DeLong K.W., Fittinghoff D.N., Sweetser J.N., Krumbügel M.A., Richman B.A., Kane D.J. Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating // Review of Scientific Instruments. — 1997. — Vol. 68, No. 9. — P. 3277–3295.

12. Miranda M., Fordell T., Arnold C., L’Huillier A., Crespo H. Simultaneous compression and characterization of ultrashort laser pulses using chirped mirrors and glass wedges // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, No. 1. — P. 688–697.

13. Kerse C., Kalaycıoğlu H., Elahi P. et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses // Nature. — 2016. — Vol. 537, No. 7618. — P. 84–88.

14. Multipass cell for high-power few-cycle compression // Optics Letters. — 2021. — Vol. 46, No. 11. — P. 2678–2681.

15. Thin-disk laser-pumped OPCPA system delivering 4.4 TW few-cycle pulses // Optics Express. — 2020. — Vol. 28, No. 23. — P. 34574–34585.

16. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect // PhotoniX. — 2022. — Vol. 3. — Art. 16. — DOI: 10.1186/s43074-022-00055-3.

17. Dynamic spatial beam shaping for ultrafast laser processing: a review // Opto-Electronic Science. — 2025. — Vol. 4. — Art. 250002.

18. Wu Y. et al. Single ultrafast pulses shaped to spatiotemporal images // Laser & Photonics Reviews. — 2025. — DOI: 10.1002/lpor.202402238.