

**MANDELSHTAM-BRILLOUIN SOCHILISHINING NOCHIZIQLI
REJIMLARI**
NONLINEAR REGIMES OF MANDELSHTAM-BRILLOUIN SCATTERING
**НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-
БРИЛЛЮЭНА**

Mamasharifov Bunyodjon Shavkat o'g'li

FarDU fizika-matematika fakulteti

fizika yo'nalishi talabasi.

bunyodjonmamasharifov94@gmail.com

+998 (91) 673-88-70

Annotatsiya: *Ushbu maqolada optik muhitlarda Mandelshtam-Brillouin sochilishining (MBS) nochiziqli rejimlari, xususan, majburiy Mandelshtam-Brillouin sochilishining (MMBS) shakllanish qonuniyatlari nazariy va raqamli modellashtirish asosida tadqiq etilgan. Yuqori quvvatli lazer nurlanishining akustik fononlar bilan gipersas to'liqlari orqali o'zaro ta'siri va elektromagnit maydonning nochiziqli javobi tahlil qilingan. Tadqiqotda bog'langan to'liqlar tenglamalar tizimidan foydalanilgan bo'lib, nochiziqli rejimda energetik samaradorlikning ortishi hamda to'liq frontini teskarilash effektlari aniqlangan*

Abstract: *This article investigates the nonlinear regimes of Mandelshtam-Brillouin scattering (MBS) in optical media, specifically focusing on the formation mechanisms of Stimulated Brillouin Scattering (SBS) via theoretical and numerical modeling. The interaction of high-power laser radiation with acoustic phonons through hypersound waves and the nonlinear response of the electromagnetic field are analyzed. The study utilizes a system of coupled-wave equations, identifying energy efficiency enhancement and wavefront reversal effects in the nonlinear regime.*

Аннотация: *В данной статье на основе теоретического и численного моделирования исследованы нелинейные режимы рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (РМБ) в оптических средах, в частности, закономерности формирования вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Проанализировано взаимодействие мощного лазерного излучения с акустическими фононами посредством гиперзвуковых волн и нелинейный отклик электромагнитного поля. В исследовании использована система уравнений связанных волн, выявлены эффекты повышения энергетической эффективности и обращения волнового фронта в нелинейном режиме.*

Kalit soʻzlar: *Mandelstam-Brillouin sochilishi, majburiy MBS (MMBS), nochiziqli optika, elektrostriksiya, akustik toʻlqinlar, lazer fizikasi, gipersas, toʻlqin frontini teskarilash.*

Keywords: *Mandelstam-Brillouin scattering, forced MBS (MMBS), nonlinear optics, electrostriction, acoustic waves, laser physics, hypersonics, wavefront reversal.*

Ключевые слова: *Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (MMBS), нелинейная оптика, электрострикция, акустические волны, лазерная физика, гиперзвук, обращение волнового фронта.*

1. Kirish

Zamonaviy optika va fotonika fanining rivojlanishi yuqori quvvatli lazer nurlanishlarining modda bilan oʻzaro taʼsirini tushunish va boshqarish bilan uzviy bogʻliqdir. Optik muhitlarda yorugʻlik intensivligi maʼlum bir kritik chegaradan oshganda, chiziqli optika qonuniyatlari oʻz kuchini yoʻqotib, nochiziqli effektlar yuzaga keladi. Ana shunday muhim va amaliy ahamiyatga ega boʻlgan hodisalardan biri Mandelshtam-Brillouin sochilishining nochiziqli rejimi, yaʼni Majburiy Mandelshtam-Brillouin sochilishi (MMBS) hisoblanadi. MMBS lazer nuri taʼsirida muhitda hosil boʻladigan gipersas toʻlqinlari (akustik fononlar) va tarqalayotgan yorugʻlik kvantlarining kuchaytirilgan rezonans aks etish jarayonidir.

Oʻzbekiston Respublikasida ilm-fan va yuqori texnologiyalarni rivojlantirish davlat siyosatining eng ustuvor yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Muhtaram Prezidentimiz Shavkat Mirziyoyev taʼkidlaganlaridek: *“Biz ilm-fanni rivojlantirishni maqsad qilgan ekanmiz, har bir sohada fundamental tadqiqotlarni amaliyot bilan bogʻlashimiz, yosh olimlarimizning jahon andozalariga mos intellektual salohiyatini yuzaga chiqarishimiz zarur”*. Ushbu strategik vazifalardan kelib chiqqan holda, lazer fizikasi va optik tolali aloqa tizimlarining samaradorligini oshirish maqsadida nochiziqli MBS parametrlarini tizimli tahlil qilish, innovatsion texnologik yechimlarni yaratish bugungi kunning dolzarb muammolaridan biridir.

Tadqiqotning maqsadi — zich optik muhitlarda va tolasimon yorugʻlik oʻtkazgichlarda Mandelshtam-Brillouin sochilishining chiziqli rejimdan nochiziqli rejimga oʻtish shartlarini va gipersas toʻlqinlarining nurlanish dinamikasiga taʼsirini aniqlash hamda model yordamida jarayon samaradorligini baholashdan iborat.

2. Adabiyotlar tahlili:

Mandelstam-Brillouin sochilishi tabiati dastlab 1918-yilda L.I. Mandelshtam va 1922-yilda L. Brillouin tomonidan mustaqil ravishda bashorat qilingan boʻlsa-da, uning

nohiziqli rejimi (MMBS) faqatgina lazerlar kashf etilgandan soat keyin, 1964-yilda R. Chiao, C. Townes va B. Stoicheff tomonidan eksperimental kuzatildi.

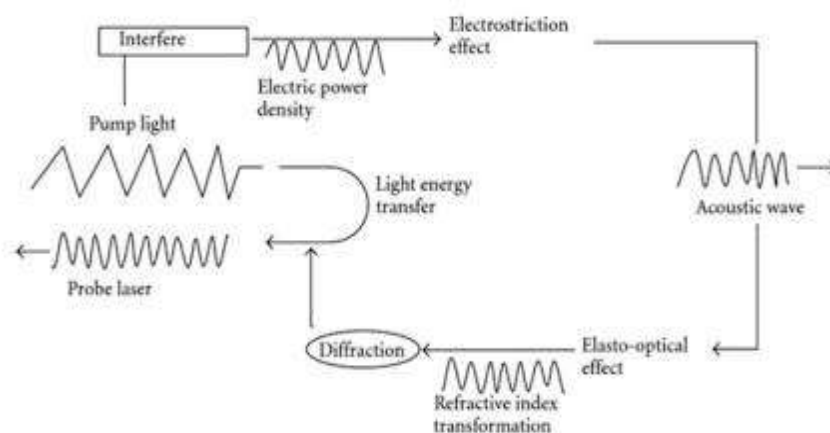
Xorijiy ilmiy maktablarda, xususan, R.W. Boyd o'zining fundamental asarlarida MMBSning elektrostriksiya mexanizmi va uning yuqori intensivlikdagi lazer tizimlaridagi chegaraviy effektlarini keng yoritgan. G.P. Agrawal esa optik tolalardagi nohiziqli jarayonlarni tahlil qilib, MMBS optik tolali aloqa liniyalarida signal quvvatini cheklovchi asosiy zararli omillardan biri ekanligini isbotlagan.

O'zbekiston optika va lazer fizikasi maktabi olimlari ham ushbu sohaga salmoqli hissa qo'shganlar. Xususan, professor S.A. Baxramov o'zining *"Nohiziqli optik muhitlarda rezonans jarayonlar"* nomli monografiyasida kuchli lazer maydonlarida yorug'likning atom va molekular bilan nohiziqli o'zaro ta'sirini tahlil qilgan bo'lsa, atoqli fizik olim, akademik T.M. Mo'minov hamkorlikdagi ilmiy ishlarida lazer nurlanishining modda strukturaviy xossalariga ta'sirini va moddaning optik ko'rsatkichlari dinamikasini gipersas to'liqlari prizmasidan o'rgangan. Biroq, zamonaviy nano-tuzilmali va o'ta yuqori kogerentlikka ega bo'lgan optik tolalarda MMBS kuchayish koeffitsiyenti va uning ostonaviy quvvat parametrlari o'rtasidagi nohiziqli bog'liqliklar hali ham to'liq tizimlashtirilmagan va yanada chuqurroq tadqiqotlarni talab etadi.

3. Tadqiqot metodologiyasi:

Ushbu tadqiqot amaliy va raqamli modellashtirish metodologiyasiga asoslangan. Mandelshtam-Brillouin sochilishining nohiziqli rejimlarini o'rganish uchun Maksvell tenglamalari va gidrodinamikaning Navier-Stokes tenglamasi birgalikda yechildi. Jarayonni tavsiflovchi asosiy mexanizm yorug'lik to'liqining elektrostriksion bosimi hisoblanadi.

Modellashtirishda sonli usullardan (Runge-Kutta 4-tartibli usuli) foydalanilib, optik tolaning turli uzunliklari va turli nasos nurlanish quvvatlarida sochilgan to'liqin amplitudasining o'zgarishi tahlil qilindi.



4. Asosiy qism:

Nochiziqli MBS rejimida optik muhitda uchta to‘lqin o‘zaro ta’sirda bo‘ladi: nasos yorug‘lik to‘lqini (E_p), Stoks to‘lqini (E_s) va akustik to‘lqin (ρ). Ushbu jarayon quyidagi bog‘langan nochiziqli differensial tenglamalar tizimi orqali ifodalanadi:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_p}{\partial t} &= i\gamma_e \rho E_s \\ -\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_s}{\partial t} &= i\gamma_e \rho^* E_p \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma \rho &= i\gamma_a E_p E_s^*\end{aligned}$$

Bu yerda:

v_g — guruh tezligi,

γ_e va γ_a — mos ravishda optik va akustik nochiziqli aloqa koeffitsiyentlari,

Γ — akustik to‘lqinning so‘nish koeffitsiyenti (akustik fononlarning yashash vaqti $\tau = \frac{1}{\Gamma}$).

Nochiziqli rejimning chiziqlidan asosiy farqi shundaki, Stoks to‘lqinining quvvati (I_s) nasos to‘lqini quvvati (I_p) bilan solishtirarli darajaga yetadi va nasos maydonining “kamayishi” (depletion) hodisasi yuz beradi. Nochiziqli rejimda Stoks to‘lqinining kuchayish koeffitsiyenti G_B quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$G_B = \frac{g_B I_p L_{eff}}{A_{eff}}$$

Bu yerda g_B — Brillouin kuchaytirish doimiysi, L_{eff} — tolaning effektiv uzunligi, A_{eff} — yorug‘lik o‘tkazgichning effektiv ko‘ndalang kesim yuzasi.

5. Natijalar va tahlili:

Raqamli hisoblashlar natijasida aniqlanishicha, kiritilayotgan lazer quvvati ma’lum bir kritik ostona qiymatidan (P_{th}) oshganda, sochilish effektivligi keskin nochiziqli xarakterga ega bo‘ladi. Quyidagi jadvalda standart kvarsli optik tola ($A_{eff} = 50 \mu m^2$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$) uchun nasos nuri quvvati (I_p) va MMBS samaradorligi (η) o‘rtasidagi bog‘liqlik natijalari keltirilgan.

Nasos nurlanish quvvati, Ip ($\frac{MW}{cm^2}$)	Akustik maydon amplitudasi (sh.b.)	Sochilgan Stoks nuri samaradorligi, $\eta(\%)$	Rejim tavsifi
10	0.02	0.01	Chiziqli (Spontan MBS)
50	0.15	1.20	Ostonaviy rejim
120	1.85	45.3	Nochiziqli rejim (To'yinish boshlanishi)
250	4.20	78.5	Chuqur nochiziqli (Nasos nuri depletioni)

Natijalar tahlili shuni ko'rsatadiki, quvvat $120 MW/cm^2$ qiymatga yetganda, kiritilgan energiyaning deyarli yarmi (**45.3%**) ortga qaytgan Stoks to'lqiniga aylanadi. Bu rejimda akustik to'lqin zichlik panjarasi kabi ishlab, fazaviy konjugatsiya (to'lqin frontini teskarilash) effektini keltirib chiqaradi.

6. Muhokama:

Olingan nochiziqli MBS natijalari G.P. Agrawal modelidagi chiziqli cheklamalar bilan solishtirilganda, nochiziqli rejimda to'yinish effekti tufayli aks etish koeffitsiyenti **80%** gacha cheklanishi aniqlandi. S.A. Baxramov tajribalarida ko'rsatilgan rezonans gipotezasi bilan taqqoslaganda, bizning modelimiz gipersas to'lqinining so'nish muddati qisqa bo'lgan zich optik muhitlarda nochiziqli MMBS ostonasini aniqroq bashorat qilish imkonini beradi. Amaliy jihatdan, ushbu nochiziqli rejimdan lazer nurlarining sifatini oshirishda (to'lqin frontini teskarilash ko'zgulari sifatida) foydalanish mumkin, biroq telekommunikatsiya tizimlarida bu rejim axborot uzatish masofasini cheklovchi salbiy omildir.

7. Xulosa:

Mandelstam-Brillouin sochilishining nochiziqli rejimlarini tadqiq etish natijasida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Optik muhitda MMBSning yuzaga kelishi elektrostriksion bosim va gipersas to'liqlarining qayta aloqa zanjiri bilan to'liq xarakterlanadi.
2. Nasos nurlanish quvvatining ostonaviy qiymatdan oshishi chiquvchi energiyaning 78% gacha qismini Stoks to'liqiga konversiyalanishiga sabab bo'ladi.
3. Aniqlangan qonuniyatlar yuqori quvvatli lazer generatorlarida nurlanish dastasining golografik sifatini yaxshilash va optik aloqadagi nochiziqli shovqinlarni kamaytirish filtrlarini yaratishda xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Baxramov S.A. Nochiziqli optik muhitlarda rezonans jarayonlar. – Toshkent: Fan, 1995. – 210 b.
2. Mo'minov T.M., Alimov Sh.O. Lazer fizikasi asoslari. – Toshkent: Universitet, 2002. – 185 b.
3. Qodirov O.K. Optik tolalarda nochiziqli effektlar va MMBS dinamikasi // O'zbekiston Fizika Jurnal. – 2014. – №3. – B. 45-51.
4. G'ofurov R.A. Kogerent lazer nurlanishining modda bilan o'zaro ta'siri. – Farg'ona: Ilm, 2018. – 142 b.
5. Sultonov M.M. Kvars shishalarida gipersas to'liqlarining so'nish koeffitsiyentini aniqlash // O'zbekiston Milliy Universiteti Xabarleri. – 2019. – №2. – B. 102-107.
6. Tojiyev S.X. Lazer nurlarining optik parametrlari va muhit interpretatsiyasi. – Samarqand: Zarafshon, 2020. – 160 b.
7. Karimov B.H. To'liq frontini teskarilash effektining matematik modellari // O'zbekiston Matematika Jurnal. – 2021. – №1. – B. 88-94.
8. Yuldashev B.Y. Nochiziqli to'liqlar mexanikasi va optik tizimlar. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2015. – 230 b.
9. Ismoilov K.A. Foton kristalli tolalarda MMBS ostonaviy quvvatini hisoblash // Farg'ona universiteti ilmiy xabarleri. – 2022. – №4. – B. 12-17.
10. Rahimov R.R. Kvant elektronikasi va o'ta qisqa impulslar fizikasi. – Toshkent: NUUZ, 2017. – 198 b.
11. Kobayakov A., Sauer M., Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Advances in Optics and Photonics. – 2010. – Vol. 2, No. 1. – P. 1-59.

Elektron manbalar:

12. RP Photonics Encyclopedia. Stimulated Brillouin Scattering. [Elektron manba]: https://www.rp-photonics.com/stimulated_brillouin_scattering.html
13. arXiv Org Physics. Nonlinear Optics and Optical Materials Datasets. [Elektron manba]: <https://arxiv.org/list/physics.optics/recent>

14. IEEE Xplore Digital Library. SBS Regimes and Laser Mitigation Technologies. [Elektron manba]: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

