

Paviršinių ultragarso bangų sužadavimo impulsiniu lazeriu tyrimai

S. Sajauskas, V. Minialga

Kauno technologijos universitetas

K. Donelaičio g. 73, LT-3006 Kaunas

Įvadas

Kietųjų izotropinių kūnų laisvajame paviršiuje gali būti sužadintos dviejų tipų paviršinės akustinės bangos (PAB), sudarytos iš skersinės ir išilginės virpesių dedamųjų, sklindančių išilgai paviršiaus. Pagal vyraujančią dedamąją, nusakančią šių bangų fizikinę prigimtį ir lemiančią jų fizikines savybes, šias dvi bangas vadinsime paviršinėmis išilginėmis bangomis (PIB) ir paviršinėmis skersinėmis bangomis (PSB). Pastarosios bangos, literatūroje dažniau vadinamos atradėjo lordo Dž. Reilėjaus (*Lord Rayleigh, tikt. John William Strutt*) vardu, yra gerai ištyrinėtos, skirtingai nuo Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko problemineje ultragarso laboratorijoje (dabar Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo centras) L. Juozonienės 1972 m. atrastųjų PIB [1-3]. Pradžioje buvo abejojama šių paviršinių bangų, sklindančių izotropinio kietojo kūno laisvajame paviršiuje, buvimu, tačiau per pastaruosius du dešimtmečius gausiais darbais Lietuvoje ir užsienyje neabejotinai įrodyta, jog PIB gali būti panaudojamos kietųjų kūnų paviršių neardomiesiems bandymams, fizikinėms bei mechaninių konstantoms matuoti [4-9].

Teoriškai PSB ir PIB buvo nustatytos nagrinėjant tūrinių išilginių bangų lūžį kietajame kūne, krintant joms į paviršių iš akustiškai minkštesnės medžiagos (skysčio) pirmuoju ir antruoju kritiniais kampais:

$$\phi_{cr}^I = \arcsin(c_L'/c_L''), \quad (1)$$

$$\phi_{cr}^{II} = \arcsin(c_L'/c_T''); \quad (2)$$

čia c_L' ir c_L'' – išilginių bangų greičiai atitinkamai pirmajame ir antrajame kūnuose, c_T'' – skersinių bangų greitis antrajame (tiriamajame) kietajame kūne. Kritiniams atspindžiams gauti turi būti tenkinamos sąlygos $c_L' < c_L''$ - kampui ϕ_{cr}^I ir $c_L' < c_T''$ - kampui ϕ_{cr}^{II} .

Šio darbo tikslas - iširti PSB ir PIB sužadavimo impulsiniu lazeriu efektyvumą, palyginti šių bangų signalų formą bei registravimo ir jų greičio matavimo metodus.

Tyrimų metodas

Akustinių bangų sužadavimo lazeriu metodas, vadinamas termoakustiniu metodu, atsirado ir išplito kartu su lazeriais, kuriais galima sukurti didelės energijos sutelktus elektromagnetinius (šviesos) srautus. Jais galima per nepaprastai trumpą laiką įkaitinti kietųjų kūnų paviršius. Esant dideliame elektromagnetinės energijos tankiui, kietojo kūno, pavyzdžiui, metalo, paviršius per kelias nanosekundes gali būti įkaitintas net iki lydymosi temperatūros. Impulsiniais lazeriais (pavyzdžiui, Nd:YAG

lazerio bangos ilgis $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$; rubino – $\lambda = 694 \text{ nm}$) trumpu impulsu ($\tau_i = 10 \dots 30 \text{ ns}$) sukuriama ypač dideli temperatūros ir mechaninių įtempių gradientai, kurie sukelia metalo deformacijas, sklindančias kietajame kūne garso (ultragarso) bangų pavidalu [10-13]. Harmoninei PAB sužadinti gali būti naudojama linijinė optinė gardelė [14], sudaryta iš pakaitomis išdėstytų skaidrių ir neskaidrių vienodo pločio juostelių, kurią apšvietus galingu lazeriu, kietojo kūno paviršiuje atsiranda periodiniai mechaniniai įtempiai. Jei gardelės periodas lygus paviršinės bangos ilgiui, tai paviršiuje šiuo būdu sužadinama harmoninė PAB.

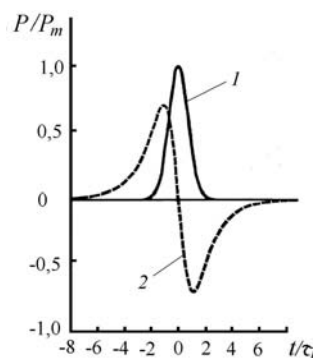
Tuo tarpu erdvėje nmoduliuotu lazerio impulsu kietojo kūno paviršiuje sukuriama mechaninių įtempių (slėgio) impulsas, kurio forma pavaizduota 1 pav.

Jei $\tau_i \ll 1/\alpha_0 c$ (čia α_0 – paviršiaus šviesos sugėrimo koeficientas, c – garso greitis kietajame kūne), tai Gauso formos lazerio impulso intensyvumas

$$I_0 f(t) = I_0 \exp\left[-(t/\tau_i)^2\right] \quad (3)$$

čia f – dažnis.

Jei $\alpha_0 = \text{const}$ plačiame dažnių diapazone Δf , tai kietojo kūno paviršiuje sukurtas slėgio impulso fronto ilgis $\sim 1/\Delta f$ (1 pav., 1 kreivė).



1 pav. Impulsinio lazerio kietojo kūno paviršiuje sukulto slėgio gradiento forma [9]: 1 – mechanškai smarkiai slopinamas paviršius; 2 – laisvas dielektriko paviršius; t – laikas; τ_i – lazerio impulso trukmė

Tuo tarpu dielektriko paviršiuje sukurtas slėgio impulso frontas aprašomas eksponente $\exp(\alpha_0 c t)$ (1 pav., 2 kreivė).

Termoakustinio metodo pranašumas, palyginti su daugeliu kitų, yra tas, kad juo galima atlikti tyrimus per atstumą, netgi per skaidrią terpę, taigi nedarant įtakos tiriamajam laisvajam paviršiui. Juo galima atlikti tikslus

akustinius matavimus ar neardomuosius bandymus agresyviose aplinkose, taip pat vakuume esančiuose objektuose. Kita vertus, atkreiptinas dėmesys, kad daugeliu impulsinių matavimų atvejų kietajame kūne vienu metu sužadindamos kelių tipų akustinės bangos (tūrinės išilginės, skersinės, PSB, PIB), kurių signalai gali sutapti laiko atžvilgiu, lėtesniųjų bangų signalai gali sumuotis su greitesniųjų bangų vidiniais atspindžiais. Tai iškraipo matavimo signalo formą, ir dėl to sumažėja tyrimų tikslumas. Be to, nedideliuose arba sudėtingos formos objektuose gali kilti signalų interpretavimo ir identifikavimo problemų.

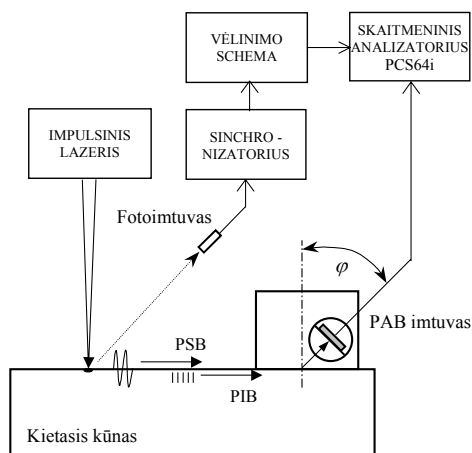
Šiuo požiūriu PIB, daugeliu atvejų būdama pati greičiausia banga, turi didelį pranašumą – jos signalai ateina į imtuvą pirmutiniai, tad PIB matavimų niekas negali sutrukdyti. Lazerinis sužadindimo metodas leidžia atlikti tikslus PIB ir PSB greičio ir slopimo lyginamuosius matavimus.

Tyrimų aparatūra ir rezultatai

Paprastai ultragarsiniame diapazone PAB sužadindamos keičiamo kampo jutikliais [16], tačiau naudojant tokio tipo jutiklius dėl pjezoelemento slopinimo nepavyksta sužadinti trumpų (plataus spektro) akustinių impulsų. Nors sužadindant PAB impulsiniu impulsiniu lazeriu, generuojančiu trumpą akustinį impulsą, sužadindami trumpi akustiniai signalai, tačiau jiems priimti naudojant įprastinius keičiamo kampo jutiklius užregistruotų PAB impulsų trukmę lemia imtuvo dažninės savybės ir paprastai jie būna ilgesni nei lazerio impulsas.

Tyrimuose PAB sužadinti naudojome rubino impulsinį lazerį ($\lambda = 0,694 \mu\text{m}$), leidžiantį tiksliai nustatyti ir keisti ultragarsinio impulso sužadindimo vietą. Į tašką sufokusuotas lazerio spindulys sužadintų sferinį slėgio frontą, kuris sklisdamas išilgai paviršiaus sukeltų į visas puses sklindančias paviršines bangas.

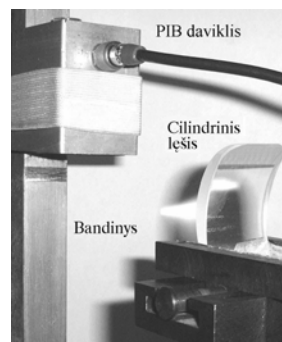
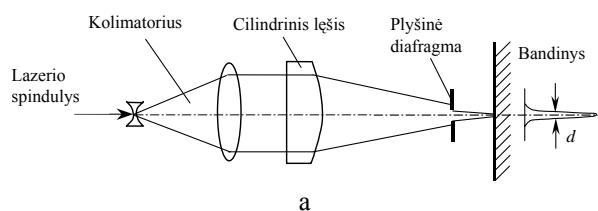
Tyrimų eksperimentinė schema pavaizduota 2 pav.



2 pav. Eksperimentinė schema impulsiniu lazeriu sužadintoms PAB tirti

Efektyvesniam PIB sužadindimui kietojo kūno paviršiaus sritį, į kurią nutaikytas lazerio spindulys, padengėme plonu lazerio šviesą sugeriančios medžiagos

sluoksniu. Kadangi PIB priimame prizminiu jutikliu, tyrimų jautriui padidinti lazerio spindulys sufokusuojamas cilindrinio lęšiu ir plyšine diafragma suformuojamas 0,2 mm pločio, 15 mm ilgio šviesos pluoštelis (3 pav.).



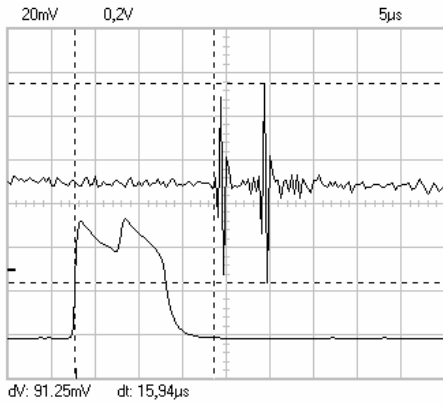
3 pav. Optinė schema

Kaip PAB imtuvas buvo naudojamas keičiamo kampo prizminis jutiklis [9], kuriame sukant jautriojo pjezoelemento cilindrinį laikiklį keičiamas tūrinių išilginių bangų kritimo į kietojo kūno paviršiu kampas. Priimtieji PAB signalai stiprinami ir registruojami skaitmeniniu signalų analizatoriumi PSC64I, kurio skleistinė sinchronizuojama fotoimtuvo, reaguojančio į lazerio blyksnį, impulsais. Tyrimams buvo naudojamas rubino lazeris, sužadindantis $\approx 1 \mu\text{s}$ trukmės šviesos impulsą ($\lambda = 694 \text{ nm}$).

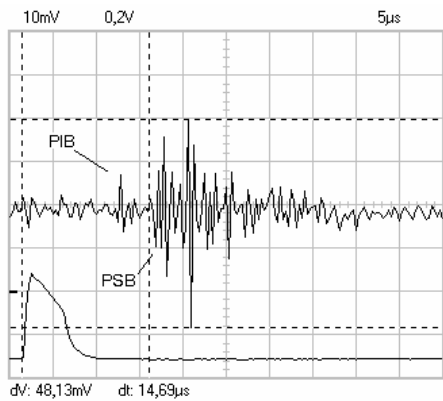
Priklausomai nuo to, koks nustatytas kritimo (priėmimo) kampas (φ_{kr}^I ar φ_{kr}^{II}), jutiklis yra jautriausias PIB arba PSB. 4 pav., a, pavaizduoti priimti PSB signalai, sužadinti dviejų lazerio impulsų (apatinė skleistinė) ir priimti PSB jutikliu ($\varphi = \varphi_{kr}^{II}$) po 15,94 μs . Tuo tarpu 4 pav., b, parodyti analogiški PIB signalai, priimti PIB jutikliu ($\varphi = \varphi_{kr}^I$), tą patį nuotolį nusklidę per 12,66 μs . Pažymėtina, kad PIB signalai yra silpnesni nei PSB, tad, padidinus skaitmeninio oscilografo jautrį, kaip pašaliniai priimami taip pat ir silpni PSB signalai.

PIB ir PSB lyginamiesiems tyrimams atlikti itin aktualu vienu metu priimti abiejų PAB tipų signalus, sužadintus tuo pačiu lazerio impulsu. Vienas iš galimų praktinių metodų – nustatyti keičiamo kampo jutiklio kritimo kampą $\varphi_{kr}^I < \varphi < \varphi_{kr}^{II}$. Nors tokiu atveju užregistruojami abiejų PAB tipų signalai, tačiau jutiklio jautris abiejų tipų signalams nėra maksimalus, signalo ir trikdžio santykis smarkiai sumažėjęs (5 pav.).

Optimaliam abiejų tipų signalų priėmimui gali būti panaudotos kampinių jutiklių konstrukcijos, pavaizduotos 6 pav.

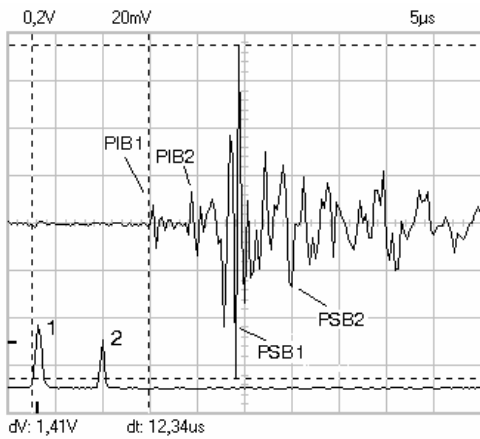


a



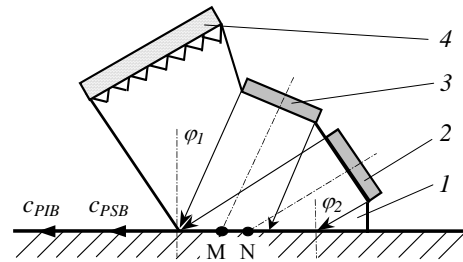
b

4 pav. Lazerio impulsais duraliuminyje sužadintų PAB signalai: a – PSB; b – PIB

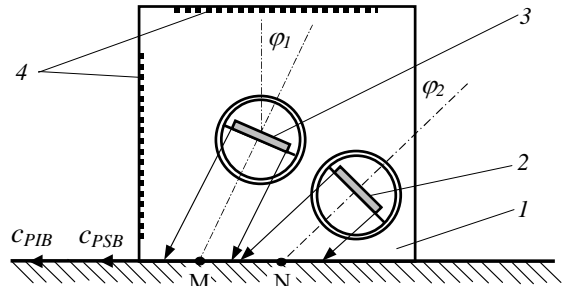


5 pav. PIB ir PSB signalai, užregistruoti kampiniu jutikliu, kurio kritimo kampas $\varphi_{kr}^I < \varphi < \varphi_{kr}^{II}$

4 pav., a, pavaizduotas biprizminis jutiklis pasižymi tuo, kad jame sutapdinti PIB ir PSB signalų įvedimo taškai. Toks jutiklis ypač patogus neardomiesiems bandymams, nes priimtų PIB ir PSB aido signalų, atsispindėjusių nuo defekto laiko intervalas priklauso tik nuo atstumo iki defekto. Tokiu jutikliu galima nustatyti defekto padėtį gaminyje, kuriame garso greitis tiksliai nežinomas [3]. Kita vertus, kiekvienos medžiagos gaminiamis tirti turi būti naudojamas kitų parametrų (kampų φ_1 ir φ_2) jutiklis.

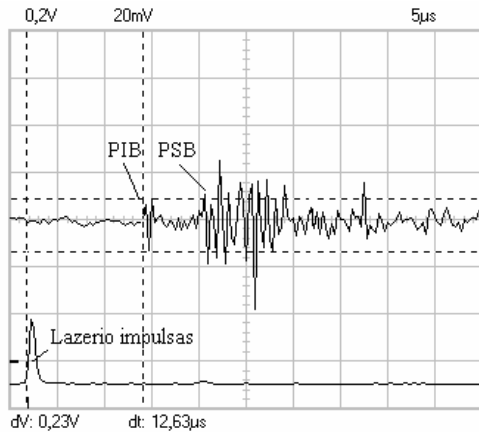


a

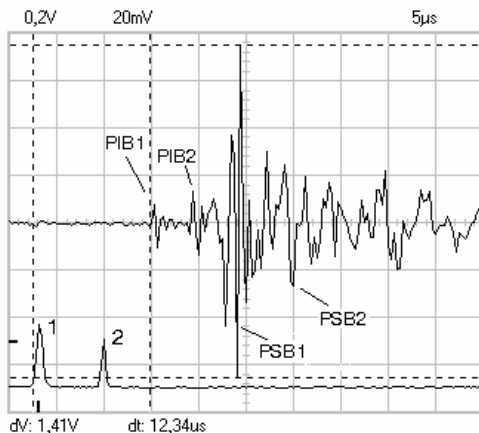


b

6 pav. Optimalaus jautrio PAB kampinių jutiklių konstrukcijos: a – biprizminis kampinis jutiklis; b – dvigubasis keičiamo kampo jutiklis



a



b

7 pav. Optimaliu kampiniu 1,8 MHz jutikliu užregistruoti PIB ir PSB impulsai, lazeriu sužadinti stiklo paviršiuje

Universalesnis yra 4 pav., b, pavaizduotas dvigubas keičiamo kampo jutiklis, tačiau bandant skirtingų medžiagų gaminius, skirtinga PSB ir PIB signalų laikinė padėtis bei amplitudžių santykis.

Optimaliu jutikliu priimti PAB signalai pavaizduoti 7 pav.

Perstūmus jutiklį tam tikru nuotoliu PAB sklidimo kryptimi, pagal signalo sklidimo trukmės pakytį apskaičiuojamas atitinkamų PAB fazinis greitis, o pagal amplitudės pokytį – PAB slopimas.

Išvados

Daugybė atliktų PIB ir SPB matavimų duraliuminio ir stiklo bandiniuose įtikinamai parodė impulsinio lazerio, kaip nekontaktinio įrankio ultragarso paviršinėms bangoms sužadinti, privalumus. Eksperimentiškai nustatyta, kad impulsiniu lazeriu efektyviai sužadinami stiprūs PIB ir PSB signalai, kurių priėmimas keičiamo kampo jutikliais, ypač optimaliais dvigubaisiais, leidžia gauti gana didelį signalą ir trikdžių santykį, reikalingą tiksliai laikiniams (fazinio greičio) ir amplitudiniams (slopimo) matavimams atlikti.

Autoriai dėkoja Prof. K. Baršausko mokslo instituto vadovams prof. R. J. Kažiui ir dr. R. Šlitteriui už tolerantišką požiūrį į impulsiniu lazeriu vykdytus tyrimus, trikdžiusius ritmingą instituto darbą.

Literatūra

1. **Серейкайте-Юозонене Л. В.** Интерферометрический метод измерения скорости ультразвука в веществах, находящихся в конденсированном состоянии. Труды вузов Литовской ССР. Ультразвук. 1972. № 4. С. 113-118.
2. **Юозонене Л. В.** Измерение скорости звуковых волн, распространяющихся в поверхностном слое вещества. Материалы 2-ой всесоюзной конференции по вопросам методики и техники ультразвуковой спектроскопии. Каунас. 1973. С. 87-88.
3. **Юозонене Л. В.** Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля. Дефектоскопия. 1980. № 8. С. 29-38.
4. **Couchman J. C., Bell J. R.** Prediction, detection and characterization of a fast surface wave produced near the first critical angle // Ultrasonics. 1978. No.16. P. 272-274.
5. **Erhard A., Wüsterberg H., Schulz E., Mundry E.** Anwendung der longitudinalen Kriechwellen in der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall und Erfahrung beim Einsatz von Kriechwellenkopfen. Materialprüfung. 1982. N 24. S. 43-48.
6. **Erhard A., Wüsterberg H., Schulz E.** Kriechwellen in der Ultraschallprüfung. Physikalische Grundlagen. Anwendung bei Schweisskonstruktionen. Schweißen und Schneiden. 1983. B.35. S.220-223.
7. **Minialga V., Sajauskas S., Sajauskas N.** Influence of liquid on the propagation of ultrasonic SAW on the rough surface. Journal of Non-Destructive Testing. 15th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT). 15-21 October 2000 in Rome (Italy). Materials and Instrumentation. – <http://www.ndt.net>, idn.727.- 6 p.
8. **Sajauskas S., Minialga V.** Paviršinių išilginių ir paviršinių skersinių bangų sąveikos su išoriniu kampu eksperimentiniai tyrimai. Ultragarasas. 2002. Nr.1(42). P. 42-45.
9. **Sajauskas S.** Paviršinių išilginių ir paviršinių skersinių bangų sužadinimo problema. Ultragarasas. 2002. Nr. 2(43). P. 17-20.
10. **Rose L. R. F.** Point source Representation for laser-generated ultrasound. Journal of Acoustical Society of America. 1984. Vol.75. No.3. P.723-732.
11. **Hutchins D. A.** Ultrasonic generation by pulsed lasers. Physicals Acoustics. San Diego: Academic Press. 1988. Vol. 18. Ch. 2.
12. **Scruby C. B., Drain L. E.** Laser ultrasonics: Techniques and applications. Bristol. 1990. P.105-111.
13. **Monchalın J.-P.** Progress Towards the application of laser-ultrasonics in industry. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1993. No.12. P.495-506.
14. **Lee R. E., White R. M.** Excitation of surface elastic waves by transient surface heating. Applied Physics Letters. 1968. Vol.12. No.1. P.12-14.
15. <http://www.ilc.msu.su/labs/305/305as.html>.
16. **Krautkrämer J., Krautkrämer H.** Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer Verlag. 1986. 752 p.

S. Sajauskas, V. Minialga

Investigation of generation of surface acoustic waves by pulsed laser

Summary

The experimental results of excitation of surface acoustic waves in solid isotropic bodies by a ruby pulsed laser are presented. It was shown that using laser pulses we can generate with high efficiency transversal surface acoustic waves (Rayleigh waves) and also longitudinal surface acoustic waves remotely in solids without special preparation of their surfaces.

Pateikta spauda: 2002 12 10