

Fotoakustički odziv tankih filmova – uticaj toplotne memorije

Mioljub Nešić¹, Marica Popović¹, Zoran Stojanović¹, Zlatan Šoškić², Slobodanka Galović¹⁻³

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, Kraljevo, Srbija

³Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Дубна, Россия

Izvod

Na osnovu generalizovanog modela fotoakustičkog odziva koji uzima u obzir uticaj toplotne memorije i na termoprovodnu i na termoelastičnu komponentu, analiziran je fotoakustički odziv tankih filmova. Pokazano je da se uticaj toplotne memorije uzorka ispoljava na učestalostima iznad određene granične učestanosti koja zavisi od toplotnih memorijskih svojstava uzorka i od njegove debljine. Izvedena je linearna relacija koja povezuje brzinu prostiranja toplote sa merenim odzivom. Uzimajući u obzir ograničenje frekventnog opsega koje nameće merni sistem, pokazano je da se u fotoakustičkom eksperimentu mogu određivati toplotna memorijska svojstva nekristalnih tankih filmova.

Ključne reči: fotoakustika, termoelastično savijanje, toplotna memorija, tanki film.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Posle izlaganja određenog uzorka dejstvu elektromagnetnog (EM) zračenja iz širokog spektra talasnih dužina, određeni procenat upadne energije biva deponovan u uzorku (ostatak se reflektuje ili prolazi kroz uzorak), a jedan deo te deponovane energije biva oslobođen u vidu toplote, pobuđujući, u uzorku i izvan njega, čitav niz fenomena koji mogu biti detektovani – fototermalnih (FT) fenomena: temperaturska dilatacija kao i defleksija površine uzorka, pojava akustičkih i termalnih talasa, kao i gradijenta optičkog indeksa prelamanja u uzorku i izvan njega. [1–4]. Ovaj rad obrađuje indirektni fotoakustički (FA) odziv materijala, pa su, shodno tome, u fokusu one promene koje dovode do pojave akustičkog signala koji može biti detektovan uz pomoć mikrofona u gasnoj komori (gas-mikrofonska postavka problema) [2,3,5–10].

Prvobitni pristup opisivanju problema fotoakustičkog odziva dat je 1975. godine [5]: pretpostavljeno je da je glavni izvor akustičnih talasa u FA komori zapreminska dilatacija tankog sloja gasa najbližeg površini uzorka, izazvana periodičnim transferom toplote sa uzorka na gas. Model je nazvan „toplotni klip“. Naredni korak je sledio 1977. kada je postojeći model proširen uračunavanjem doprinosa mehaničkih vibracija nastalih usled toplotne dilatacije samog uzorka (mehanički klip) [6] – novonastali model je dobio ime „kompozitni klip“. Konačno, 1982. biva objašnjena uloga „efekta bubnja“ kod uzoraka čiji je poprečni presek mnogo veći od kvadrata debljine, usled pojave gradijenta temperature normalnog na veću dimenziju uzorka. Ovaj efekat je naz-

van termoelastično (TE) savijanje i njime je proširen model mehaničkog i kompozitnog klipa [7].

Svi ovi modeli FA signala su zasnovani na pretpostavci da se optički generisana toplota prostire difuzijom [1–15], isključujući uticaj nenultog termalnog vremena relaksacije i konačne brzine prostiranja toplote, koji opisuju toplotnu memoriju materijala [16–22]. U ovom radu je u model kompozitnog klipa uključen uticaj toplotne memorije, sa ciljem da generalizovani model omogući FA određivanje toplotnih memorijskih svojstava.

TEORIJA

U indirektnoj transmisioj fotoakustici, koristi se fotoakustička ćelija ispunjena vazduhom kao element u kome se stvara akustički signal uz pomoć delovanja amplitudski modulisanog monohromatskog svetlosnog izvora $I = I_0(1 + \cos \omega t) / 2$ na uzorak. Obično se koristi cilindrična FA ćelija u kojoj je uzorak oblika diska poluprečnika R i debljine l_s , jednostavno učvršćen na rastojanju R' od centra uzorka. Ovakav uzorak se, kroz vazduh, obasjava sa jedne strane opisanim izvorom, dok se akustički odziv sistema snima mikrofonom u vazdušnoj koloni FA ćelije sa druge strane uzorka – transmisiona gas-mikrofonska konfiguracija (slika 1). Uvedene su sledeće oznake za termalna svojstva sistema prikazanog na slici 1: D_{Ti} – toplotna difuzivnost [m^2/s], k_i – toplotna provodnost [W/mK], τ_i – toplotno vreme relaksacije [s] i $u_i = \sqrt{D_{Ti} / \tau_i}$ – brzina prostiranja toplote [m/s], sa indeksom $i = a, s$ koji označava i -tu sredinu (vazduh ili uzorak).

Pri razvoju direktnog modela FA signala korišćene su sledeće pretpostavke: a) površina poprečnog preseka upadnog snopa mnogo je veća od obasjane površine samog uzorka, pa se računajući na planarnu uni-

NAUČNI RAD

UDK 538.975

Hem. Ind. 67 (1) 139–146 (2013)

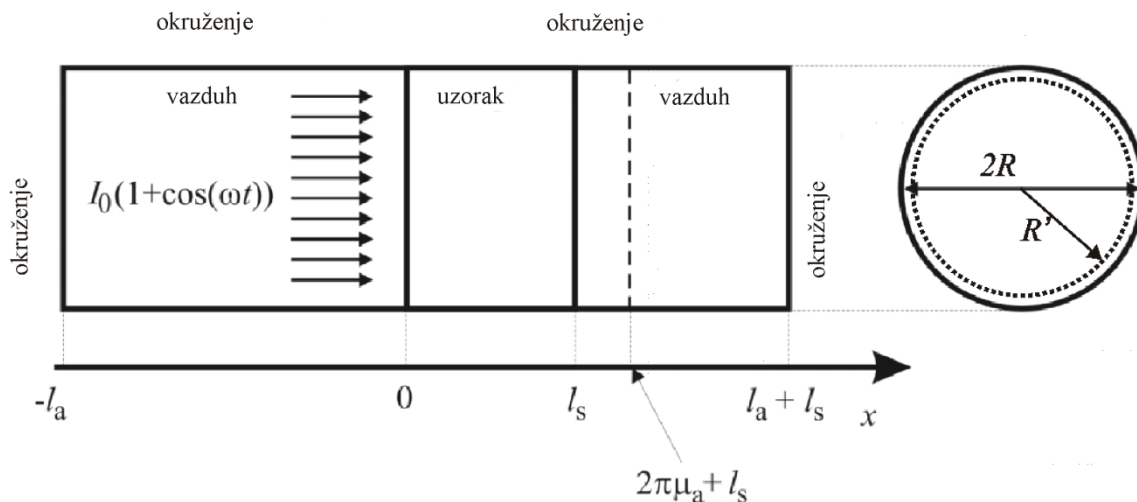
doi: 10.2298/HEMIND120302052N

Preписка: M. Nešić*, S. Galović**, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, p. fah 522, 11001 Beograd, Srbija.

E-pošta: *mioljub.nesic@vinca.rs, **bobagal@vinca.rs

Rad primljen: 2. mart, 2012

Rad prihvaćen: 21. maj, 2012



Slika 1. Geometrija sistema. Mikrofon (nije prikazan na slici) nalazi se u l_s+l_a .
 Figure 1. Geometry of the system. The microphone (not shown in the picture) is located in the point l_s+l_a .

formnost energetske raspodele upadnog snopa, uvodi 1D aproksimacija [5–8,11–15,22]; b) pobudna energija se apsorbira unutar tankog površinskog sloja uzorka (aproksimacija koja dobro opisuje ponašanje metala, inače se postiže nanošenjem tankog, neprovidnog, apsorpcionog sloja na površinu uzorka) [7,12]; c) odavanje toplote u okolni gas je zanemarljivo usled njegove slabe toplotne provodnosti [7]; d) posmatra se samo harmonijska komponenta Furijeove (Fourier) transformacije signala zbog lock-in detekcije i analize frekventne karakteristike FA signala; e) moguće je primeniti aproksimaciju tanke ploče zbog toga što je R mnogo veće od l u kome se zanemaruje uticaj dilatacije uzorka na mehanički klip i uzima u obzir samo TE savijanje [7,8,11,14].

Na osnovu literature [7,8,11,13–15], početni izraz modela (za mereni signal direktno proporcionalan promeni pritiska uz FA komori) može se izraziti u obliku:

$$\tilde{p} = \tilde{p}_{th} + \tilde{p}_{ac} \tag{1}$$

gde p_{th} označava promenu pritiska nastalu usled komponente FA odziva koja potiče od transfera toplote iz uzorka u okolni gas (u daljem tekstu: termalni klip (TK)), dok p_{ac} označava promenu pritiska usled komponente FA odziva koja potiče od termostatičkih vibracija.

Dakle, za opisanu konfiguraciju, pod zadatim uslovima i pretpostavkama, ove dve komponente se matematički izražavaju na sledeći način [7, 8,14]:

$$\tilde{p}_{th} = \frac{\gamma P_0}{l_a T_0} \int_{l_s}^{l_s+2\pi\mu_a} \tilde{\vartheta}_s(l_s) e^{-\tilde{\sigma}_a(x-l_s)} dx \tag{2}$$

$$\tilde{p}_{ac} = \frac{3\gamma P_0}{l_a} a_T \frac{R^2}{l_s^3} \int_0^{l_s} (x - \frac{l_s}{2}) \tilde{\vartheta}_s(x) dx \tag{3}$$

gde su: γ eksponent adijabatičnosti, P_0 atmosferski pritisak, l_a dužina gasne kolone u FA ćeliji, T_0 sobna

temperatura, a_T koeficijent linearnog širenja, R poluprečnik, a l_s debljina uzorka.

U relacijama (2) i (3) može se uočiti da TK komponenta zavisi od temperaturske varijacije na heteropovrši uzorak–gas, a integracija se vrši izvan uzorka: od tačke gde se završava uzorak a počinje gas, l_s , pa do $2\pi\mu_a$ (μ_a je toplotna difuziona dužina u gasu [22]). To je i logično, s obzirom na to da se posmatra sloj gasa neposredno uz površinu uzorka čija dilatacija predstavlja izvor akustičnih talasa. S druge strane, TE komponenta zavisi od temperaturske raspodele unutar samog uzorka, pa sa i integracija tako vrši po debljini uzorka, od 0 do l_s .

Ono što je zajedničko za obe komponente je važnost poznavanja temperaturske raspodele unutar uzorka: neophodna je za izračunavanje površinske temperature uzorka kod TK komponente (koja predstavlja graničnu vrednost temperaturske raspodele unutar uzorka), a u TE komponenti učestvuje u integralu koji predstavlja rezultat proračuna napona po svim osama u materijalu, nastalih kao posledica FT efekta.

Polazeći od linearne generalizovane teorije provođenja toplote koja uzima u obzir uticaj toplotne memorije, raspodela temperaturske varijacije u uzorku kao i njena vrednost na površini uzorka mogu se na osnovu [20] izraziti u sledećem obliku:

$$\tilde{\vartheta}_s(x) = S_0 \tilde{Z}_{cs} \frac{ch(\tilde{\sigma}_s(x-l_s))}{sh(\tilde{\sigma}_s l_s)} \tag{4}$$

$$\tilde{\vartheta}_s(l_s) = S_0 \tilde{Z}_{cs} \frac{1}{sh(\tilde{\sigma}_s l_s)} \tag{5}$$

gde su radi pojednostavljenja izraza i preglednosti uvedeni parametri toplotne impedanse, Z_{cs} , i koeficijenta prostiranja toplotnih talasa, σ_s , koji su dati izrazima:

$$Z_{cs} = \frac{\sqrt{D_\tau}}{k} \sqrt{\frac{1+j\omega\tau}{j\omega}} \quad (6)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{D_\tau}} \sqrt{j\omega(1+j\omega\tau)} \quad (7)$$

Sa $\omega = 2\pi f$ označena je ugaona brzina (a f učestalost) vremenske modulacije izvora.

Zamenom (4) i (5) u jednačine (1)–(3) u ukupni model postaje:

$$\tilde{p}_{th} = S_0 \frac{\gamma P_0}{I_a} \frac{\tilde{Z}_{cs}}{\tilde{\sigma}_a} \frac{1}{sh(\tilde{\sigma}_s l_s)} \quad (8)$$

$$\tilde{p}_{ac} = S_0 \frac{3\gamma P_0}{I_a l_s^3} a_\tau R^2 \frac{\tilde{Z}_{cs}}{\tilde{\sigma}_s^2} \frac{ch(\tilde{\sigma}_s l_s) - \frac{\tilde{\sigma}_s l_s}{2} sh(\tilde{\sigma}_s l_s) - 1}{sh(\tilde{\sigma}_s l_s)} \quad (9)$$

$$\tilde{p} = E_0 \frac{1}{1+j\omega\tau_e} (\tilde{p}_{th} + \tilde{p}_{ac}) = E_0 \frac{\tilde{p}_{th}}{1+j\omega\tau_e} \left(1 + \frac{\tilde{p}_{ac}}{\tilde{p}_{th}}\right) \quad (10)$$

U izrazu (10) uzet je u obzir uticaj elektronskih komponenti mernog sistema na frekventni fotoakustički odziv [12,13] kroz član $E_0 / (1+j\omega\tau_e)$, a njegov uticaj se obično isključuje kroz različite postupke normalizacije [12].

Kada se zanemari uticaj toplotne memorije i uzorka i okruženja na odziv sistema, izrazi (8)–(10) se svode na klasične izraze za model kompozitnog klipa [7–11,13–15].

DISKUSIJA

U ovom radu posmatramo uzorke tanje od sopstvene minimalne difuzione dužine, $l_s \leq 2\sqrt{D_\tau \tau_s}$. Ovakvi uzorci [22] mogu se smatrati tankim filmovima. Kada se razmotre literaturne vrednosti za toplotnu difuzivnost [23,24,28] i teorijske procene toplotnog vremena relaksacije [19–21] dobija se da su to uzorci sledećih dimenzija: metali ~10 nm, monokristalni poluprovodnici ~100 nm, dopirani poluprovodnici, oksidi, polimeri 10–100 μm . U našim prethodnim radovima [22,25], pokazali smo da se kod ovakvih uzoraka prisustvo toplotne memorije manifestuje kroz neekvidistantno i prigušeno oscilatorno ponašanje amplitudskih i faznih karakteristika TE komponenti u uskom opsegu visokih učestanosti, na frekvencijama iznad određene granične frekvencije na kojima je uzorak toplotno „debeo“, koje se formuliše u bezdimenzionom obliku sledećim izrazom:

$$\Omega > \Omega_{ac} = \sqrt{(\sqrt{T_{00}^4 + 264} - T_{00}^2) / (2T_{00}^2)} \quad (11)$$

gde su $\Omega = \omega\tau_s$ i $T_{00} = l_s / \sqrt{D_\tau \tau_s}$.

Kod TK komponente se uočava neprigušeno ekvidistantno oscilovanje amplitudske karakteristike i perio-

dično linearno opadanje fazne karakteristike na visokim frekvencijama, $\Omega > \Omega_{th} = \pi^2 / (2T_{00} \sqrt{T_{00}^2 + \pi^2})$ na kojima je takođe uzorak toplotno debeo. Vrednosti amplitudskih lokalnih ekstremuma su u obe komponente i po nekoliko redova veličine veće od predviđanja zasnovanih na klasičnom modelu [22,25]. Na osnovu toga, logično je očekivati da se toplotna memorijska svojstva mogu određivati iz visokofrekventnih FA merenja, $\Omega > \min(\Omega_{th}, \Omega_{ac})$.

Analizom izraza (10) pokazuje se da amplitudska i fazna karakteristika FA odziva tankih filmova na složen način zavise ne samo od toplotnih memorijskih svojstava uzorka i vazduha koji ga okružuje, već i od toplotne difuzivnosti, toplotne provodnosti, koeficijenta linearnog širenja i debljine uzorka, ali i od elektronske prenosne karakteristike mernog sistema. Da bi odredili toplotna svojstva iz FA odziva, treba rešiti inverzni problem sa funkcijom koja zavisi od mnogo parametara. Rešavanje inverznog problema, tj. određivanje toplotnih memorijskih svojstava primenom teorije kompozitnog klipa predstavlja loše uslovljen problem matematičke fizike, što se može povezati sa velikim uticajem šuma na svojstva koja se određuju [26,27]. Da bi ispitali mogućnost smanjivanja broja parametara, odnosno smanjivanje broja uslovljenosti problema na učestanostima na kojima dolazi do izražaja uticaj toplotne memorije, ispitivan je odnos TE i TK komponente.

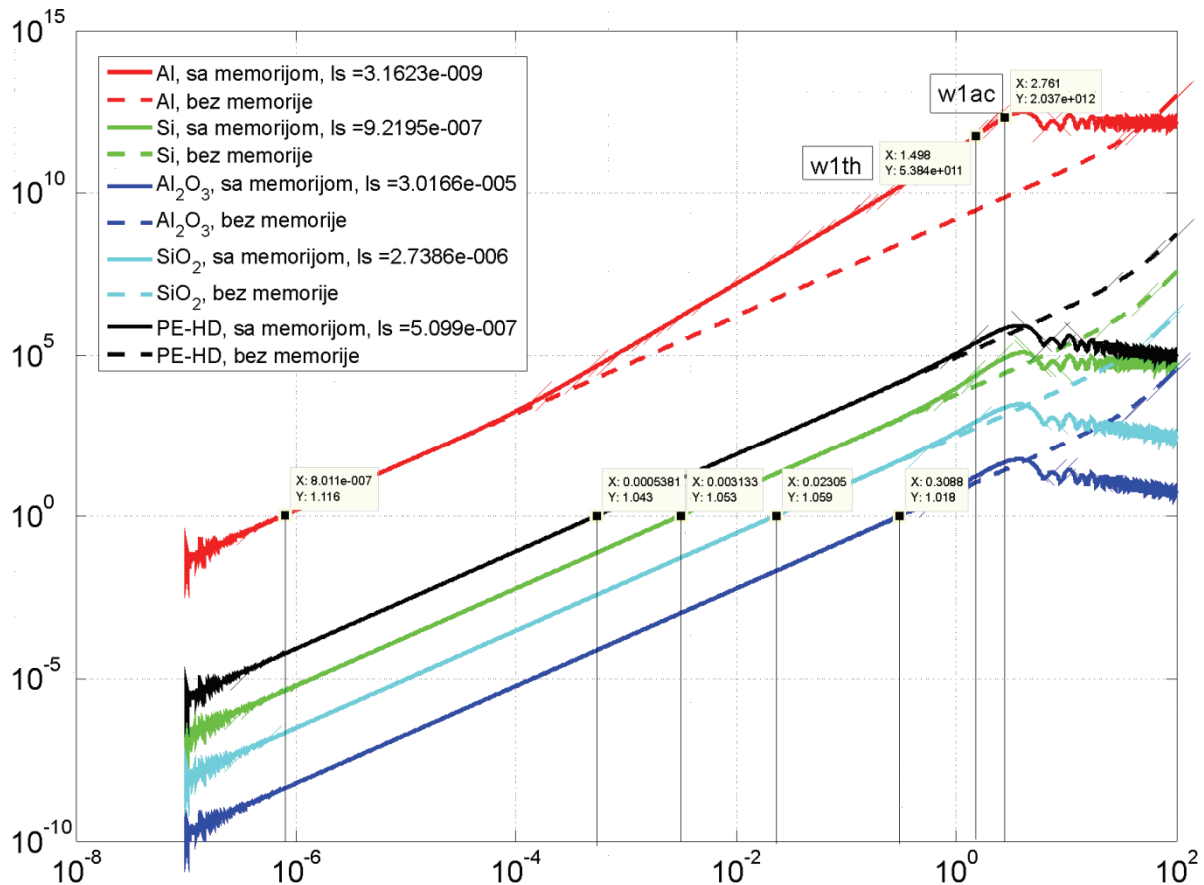
Koristeći literaturne vrednosti za toplotne parametre različitih uzoraka i vazduha i teorijske procene za termalno vreme relaksacije, date u Tabeli 1, na slici 2 prikazan je odnos amplituda TE i TK komponente za nekoliko uzoraka (izrazi (8) i (9)) u zavisnosti od bezdimenzionog parametra Ω i za izloženi (punim linijama) i za prethodne modele (isprekidanim linijama). Granična vrednost ovog parametra i shodno tome modulacione učestanosti, na kojoj ove dve komponente postaju približno jednake, može se na osnovu izraza (8) i (9) odrediti rešavanjem sledeće transcendentne jednačine:

$$\left\| \frac{3a_\tau T_0 R^2}{\tau_s \sqrt{D_\tau D_\tau a T_{00}}} \frac{ch(\tilde{\sigma}_s l_s) - (\tilde{\sigma}_s l_s / 2) sh(\tilde{\sigma}_s l_s) - 1}{\tilde{\sigma}_s l_s} = 1 \right\| \quad (12)$$

Tabela 1. Toplotne osobine materijala

Table 1. Heat properties of various materials

Materijal	$aT \times 10^6$ °C	k W/mK	$D_\tau \times 10^6$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	τ_s s
Al	23	237, 250	99,1	10^{-14} – 10^{-12}
Si	2,6	140	84,62	10^{-8} – 10^{-6}
Al ₂ O ₃	8,4	32	9,1	10^{-6} – 10^{-3}
SiO ₂	12,3 (staklo)	1,38	0,74	10^{-6} – 10^{-3}
	0,4–0,55 (topljeni)			
PE-HD	110–130, 200	0,45	0,17–0,26	10^{-6} – 10^{-3}



Slika 2. Odnos amplituda termoelastične (TE) komponente i komponente FA signala koja se pojavljuje zbog formiranja termalnog klipa (TK) za različite tanke filmove, sa toplotnom memorijom (puna linija) i bez nje (isprekidana linija), u zavisnosti od bezdimenzionog parametra Ω , proporcionalnog sa učestanostalošću modulacije. Na slici su označene vrednosti parametra Ω na kojima počinje da se ispoljava uticaj toplotne memorije i na kojima počinje dominacija TE komponente.

Figure 2. Thermoelastic (TE) and thermal piston (TP) components' amplitude ratio, given for various materials in the form of thin films, with thermal memory (solid line) and without it (dashed line), as a function of dimensionless parameter Ω , proportional to modulation frequency. In the figure, the values of parameter Ω where thermal memory influence becomes noticeable and where TE component becomes dominant are indicated.

Kao što se može videti sa slike 2, granična vrednost parametra Ω zavisi najviše od vrednosti koeficijenta linearnog širenja i na nju ne utiču toplotna memorijska svojstva (u ovom opsegu učestanosti prethodni modeli i izloženi model se poklapaju). Što je ovaj koeficijent veći, i granična učestanost se pomera prema većim vrednostima. Ali, za sve materijale, ova granična učestanost je značajno manja od učestanosti na kojoj počinje da se ispoljava toplotna memorija kod tankih filmova. Na slici 2 takođe može da se uoči da je na učestanostima na kojima počinje da se ispoljava toplotna memorija, amplituda TE komponente za nekoliko redova veličina veća od amplitude TK komponente. Na osnovu ove analize, nije teško zaključiti da prilikom određivanja termalnih memorijskih svojstava, FA odziv na visokim učestanostima može da se aproksimira samo TE komponentom.

Na slici 3 prikazane su TK, TE i ukupna amplituda FA signala u zavisnosti od parametra Ω , za nekoliko tankih

filmova (tabela 1), pod pretpostavkom da je parametar $T_{00} = 1$.

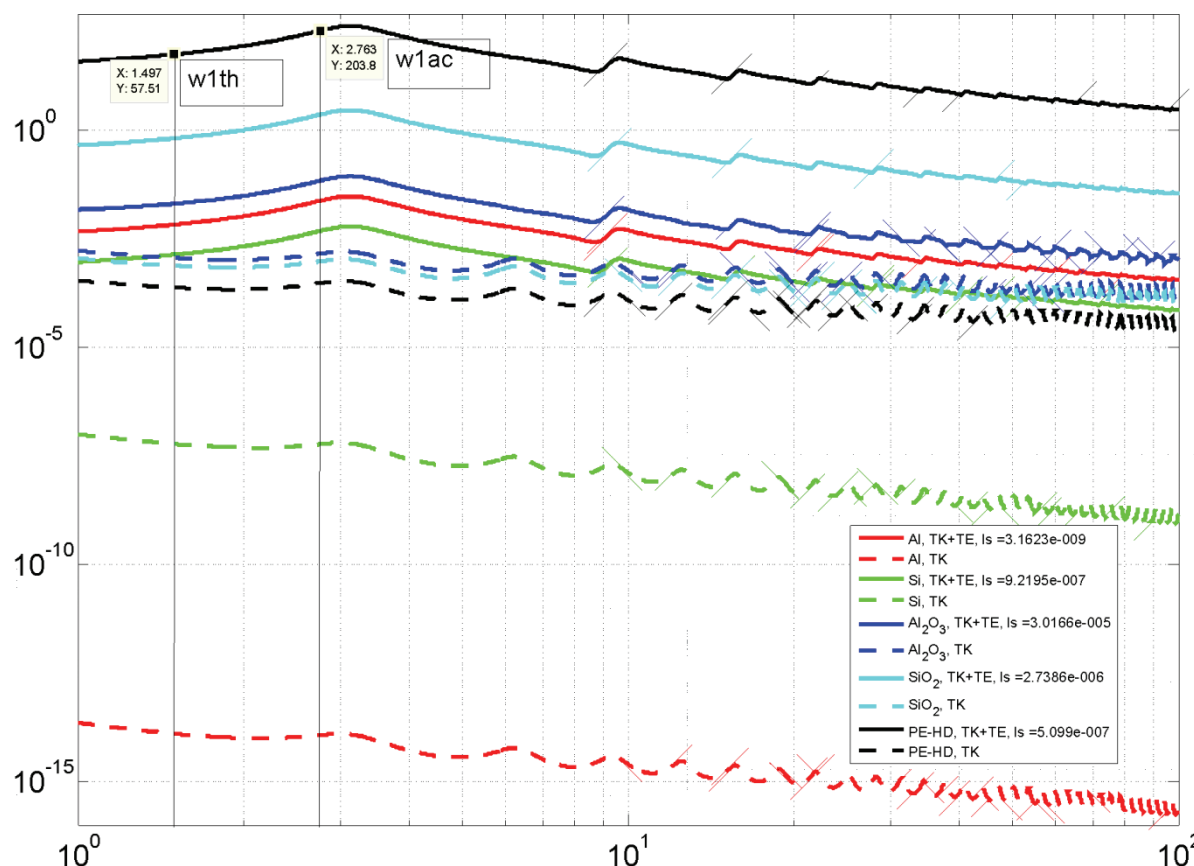
Koristeći rezultate iz našeg prethodnog rada [25] pokazuje se da je vrednost parametra Ω na kojoj se pojavljuje prvi lokalni maksimum u amplitudskoj karakteristici određena izrazom:

$$\Omega_{\max} = \pi / T_{00}$$

što samo po sebi predstavlja izuzetno važan rezultat s obzirom da direktno i najočiglednije povezuje lako uočljivu veličinu kao što je prvi maksimum oscilacija (koji je ujedno i najizraženiji!) sa brzinom prostiranja toplote kroz uzorak, sledećom linearnom relacijom:

$$f_{\max} = c_{th} / (2l_s) \quad (13)$$

Pomoću literaturnih podataka datih u Tabeli 1, izračunate su karakteristične učestanosti za nekoliko materijala i date u Tabeli 2.



Slika 3. Amplitudske karakteristike TE i TK komponente FA odziva i ukupnog FA odziva (poklapa se u potpunosti sa TE komponentom) različitih tankih filmova sa toplotnom memorijom, u frekventnom opsegu u kome se ispoljavaju toplotna memorijska svojstva. Figure 3. Amplitude characteristics of TE and TP components of the PA response of different thin films, with thermal memory, within frequency range where thermal memory properties are clearly visible. Overall PA response (TE+TP) completely overlaps with TE component, marking out its domination over the range.

Tabela 2. Opseg položaja prvog maksimuma za različite materijale od interesa Table 2. First maximum position for different materials of interest

Materijal	Položaj prvog maksimuma
Al	500GHz–500THz
Si	500kHz–50MHz
Al ₂ O ₃	500Hz–500kHz
SiO ₂	500Hz–500kHz
PE-HD	500Hz–500kHz

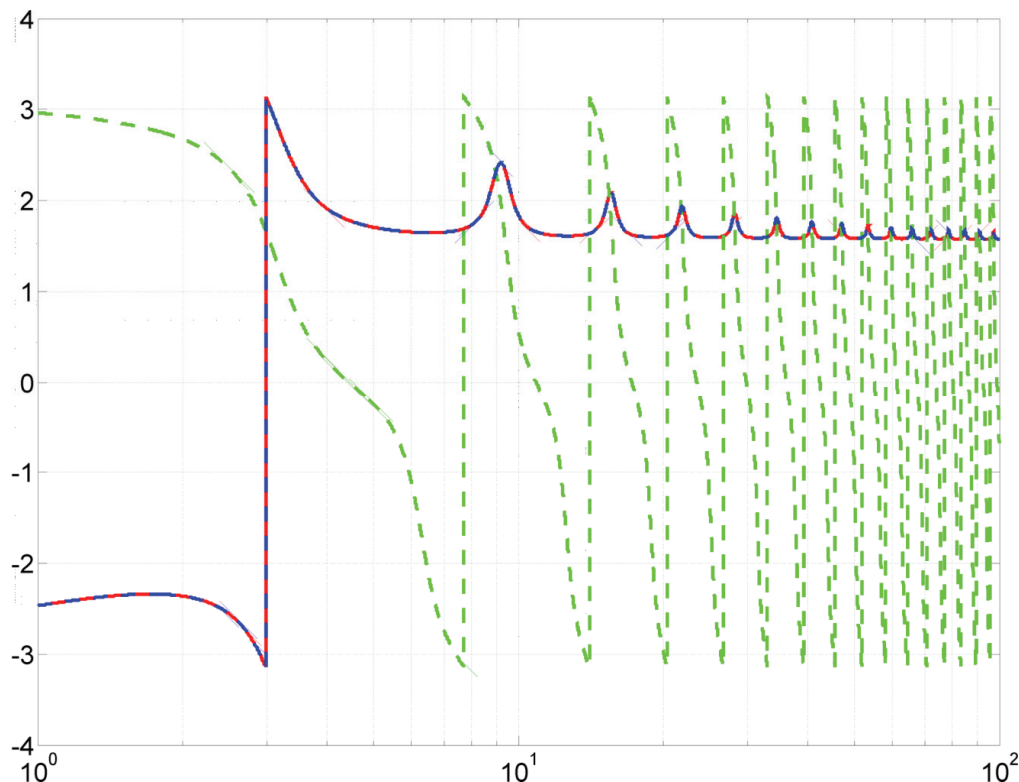
Kao što se može videti iz tabele 2, karakteristične učestanosti za metale i monokristalne poluprovodnike nalaze se daleko izvan opsega koji je moguće ostvariti u FA merenjima (10Hz–100kHz), pa kod ovakvih tankih filmova nije moguće odrediti termalna memorijska svojstva primenom transmisiona FA konfiguracije. Naprotiv tome, za polimerne i keramičke tanke filmove, okside poluprovodnika itd, kod kojih je termalno vreme relaksacije po teorijskim procenama veće od 10^{-6} s, visokofrekventna FA merenja mogu da se iskoriste za jednostavno određivanje brzine prostiranja toplote na osnovu relacije (13).

Interesantno je napomenuti da zbog činjenice da metali i poluprovodnici pokazuju uticaj termalnih memorijskih svojstava na značajno višim učestanostima od materijala slabije uređene strukture, oni mogu biti iskorisćeni kao referentni uzorci i za postupke normalizacije kojima se dodatno smanjuje loša uslovljenost inverznog FA problema [26].

Model dat u [25] pokazuje da je na osnovu veličine signala u normiranoj amplitudskoj karakteristici moguće određivati termalno vreme relaksacije i druga toplotna svojstva, ali je relacija koja ih povezuje komplikovana i manje pogodna od relacije (13).

Na slici 4 prikazane su fazne karakteristike TK i TE komponente (isprekidanim linijama) i ukupna fazna karakteristika FA odziva u zavisnosti od parametra Ω , pod pretpostavkom da je $T_{00} = 1$.

tanostima modulacije dominantna termoelastična komponenta. Istaknuto je da granična učestanost, na kojoj počinje dominacija ove komponente, zavisi od koeficijenta linearnog širenja, i prema literaturnim podacima



Slika 4. Fazna karakteristika TE i TK komponente FA odziva i ukupnog FA odziva u zavisnosti od bezdimenzionog parametra Ω , proporcionalnog sa učestanošću modulacije, u opsegu Ω u kome se ispoljavaju toplotna memorijska svojstva.

Figure 4. Phase characteristics of TE and TP components of the PA response, as functions of dimensionless parameter Ω , proportional to modulation frequency, within the range where thermal memory properties are clearly visible.

Pošto fazna karakteristika zavisi samo od ovog parametra, prikazane karakteristike opisuju fazu visokofrekventnog odziva za tanki film sačinjen od bilo kog materijala. Kao što se može videti sa slike 4, dominacija TE komponente na visokim učestanostima na kojima dolazi do izražaja uticaj toplotne memorije, ispoljava se i u faznoj karakteristici (ukupna fazna karakteristika se poklapa sa fazom TE komponente). Na osnovu rezultata rada [25], položaj lokalnih faznih maksimuma i veličine normiranih faza su takođe povezani sa brzinom prostiranja toplote, termalnim vremenom relaksacije i toplotnom difuzivnošću, ali složenim transcendentnim jednačinama, zbog čega su visokofrekventna fazna merenja manje pogodna za određivanje termalnih memorijskih svojstava od amplitudskih.

ZAKLJUČAK

Na osnovu generalizovane teorije kompozitnog klipa, koja uzima u obzir uticaj toplotne memorije, pokazano je da je kod tankih filmova na visokim učes-

za ovu veličinu, niža je nekoliko puta od graničnih učestanosti na kojima počinje da se ispoljava uticaj toplotne memorije i u termoelastičnoj i u komponenti FA signala koja se javlja kao posledica formiranja termalnog klipa. Zbog toga je za određivanje toplotnih memorijskih svojstava kod tankih filmova dovoljno uzeti u obzir samo termoelastičnu komponentu. Izvedena je jednostavna linearna relacija koja povezuje učestanost na kojoj se pojavljuje prvi maksimum u amplitudskoj karakteristici sa brzinom prostiranja toplote. Na osnovu teorijskih procena za termalno vreme relaksacije zaključeno je da se ovaj teorijski model može primeniti za određivanje brzine prostiranja toplote samo kod tankih filmova od nemonokristalnih materijala, kao što su keramike, polimeri, polikristalni poluprovodnici i poluprovodnička jedinjenja i legure. Za monokristalne materijale učestanost prvog maksimuma se nalazi u opsegu modulacionih frekvencija koje su izvan domena ostvarljivog u FA eksperimentima.

LITERATURA

- [1] H. Vargas, L.C.M. Miranda, Photoacoustic and related photothermal techniques, *Phys. Rep.* **161** (1988) 43–101.
- [2] A.C. Tam, Applications of photoacoustic sensing techniques, *Rev. Mod. Phys.* **58** (1986) 381–431.
- [3] H.K. Park, C.P. Grigoropoulos, A.C. Tam, Optical measurements of thermal diffusivity of a material, *Int. J. Thermophys.* **16** (1995) 973–995.
- [4] M. Terasina, N. Hirota, S.E. Braslavsky, A. Mandelis, S.E. Bialkowski, G.J. Diebold, R.S.D. Miller, D. Fournier, R.A. Palmer, A. Tam, Quantities, terminology, and symbols in photothermal and related spectroscopies, *Pure Appl. Chem.* **76** (2004) 1083–1111.
- [5] A. Rosencwaig, A. Gersho, Theory of the photoacoustic effect with solids, *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 64–69.
- [6] F. McDonald, G. Westel, Generalized theory of the photoacoustic effect, *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 2313–2322.
- [7] G. Rousset, F. Lepoutre, L. Bertrand, Influence of thermoelastic bending on photoacoustic experiments related to measurements of thermal diffusivity of metals, *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 2383–2391.
- [8] L.F. Perondi, L.C.M. Miranda, Minimal-volume photoacoustic cell measurement of thermal diffusivity: Effect of the thermoelastic sample bending, *J. Appl. Phys.* **62** (1987) 2955–2959.
- [9] D.M. Todorovic, P.M. Nikolic, in: *Progress in Photothermal and Photoacoustic Science and Technology*, Vol. IV, A. Mandelis, P. Hess (Eds.), Carrier Transport Contribution on Thermoelastic and Electronic Deformation in Semiconductors, SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2000.
- [10] P.M. Nikolić, D.M. Todorović, An investigation of semiconducting materials using a photoacoustic method, Serbian Academy of Sciences and Arts, Department of Technical Sciences Book 40, monographs vol. DCXLVIII, Belgrade, 2001 (in Serbian).
- [11] A.M. Mansanares, H. Vargas, F. Galembeck, J. Buijs, D. Bicanic, Photoacoustic characterization of a two-layer system, *J. Appl. Phys.* **70** (1991) 7046–7050.
- [12] J.A. Balderas-Lopez, A. Mandelis, Thermal diffusivity measurements in the photoacoustic open-cell configuration using simple signal normalization techniques, *J. Appl. Phys.* **90** (2001) 2273–2279.
- [13] C.A.S. Lima, M.B.S. Lima, L.C.M. Miranda, J. Baeza, J. Freer, N. Reyes, J. Ruiz, M.D. Silva, Photoacoustic characterization of bleached wood pulp and finished papers, *Meas. Sci. Technol.* **11** (2000) 504–508.
- [14] J.L. Pichardo-Molina, J.J. Alvarado-Gil, Heat diffusion and thermoelastic vibration influence on the signal of an open photoacoustic cell for two layer systems, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 6450–6456.
- [15] J. Cao, Interferential formulization and interpretation of the photoacoustic effect in multi-layered cells, *J. Phys. D* **33** (2000) 200–206.
- [16] D.D. Joseph, L. Preziosi, Heat waves, *Rev. Mod. Phys.* **61** (1989) 41–73.
- [17] I.A. Novikov, Harmonic thermal waves in materials with thermal memory, *J. Appl. Phys.* **81** (1997) 1067–1072.
- [18] M.N. Ozisik, D.Y. Tzou, On the wave theory in heat conduction, *ASME J. Heat Transfer* **116** (1994) 526–536.
- [19] A. Vedavarez, S. Kumar, M.K. Moallemi, K. Mitra, Significance of Non-Fourier heat waves in conduction, *ASME J. Heat Transfer* **116** (1994) 221–224.
- [20] S. Galović, D. Kostoski, Photothermal wave propagation in media with thermal memory, *J. Appl. Phys.* **93** (2003) 3063–3071.
- [21] K.R. Sharma, On the solution of damped wave conduction and relaxation equation in a semi-infinite medium subject to constant wall flux, *Int. J. Heat Mass Trans.* **51** (2008) 6024–6031.
- [22] M. Nešić, P. Gušavac, M. Popović, Z. Šoškić, S. Galović, Thermal memory influence on thermoconducting component of indirect photoacoustic response, *Phys. Scripta* **T149** (2012) 014018.
- [23] H. Tada, A.E. Kumpel, R.E. Lathrop, J.B. Slanina, P. Nieva, P. Zavracky, I.N. Miaoulis, P.Y. Wong, Thermal expansion coefficient of polycrystalline silicon and silicon dioxide thin films at high temperatures, *J. Appl. Phys.* **87** (2000) 4189–4194.
- [24] Aluminium Oxide, http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide; Silicon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>.
- [25] M. Nešić, M. Popović, S. Galović, Uticaj toplotne memorije na termoelastičnu komponentu fotoakustičkog odziva, *Hem. Ind.* **65** (2011) 219–227.
- [26] J.A. Baldares-Lopez, A. Mandelis, J. A. Garcia, Normalized photoacoustic techniques for thermal diffusivity measurements of buried layers in multilayered systems, *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 3047–3056.
- [27] A. Popović, Z. Šoškić, D. Stojanović, D. Čevizović, S. Galović, On the applicability of the effective medium approximation to the photoacoustic response of multilayered structures, *Phys. Scripta* **T149** (2012) 014066.
- [28] Thermal Conductivity of Common Metals, Alloys and Materials, http://www.engineersedge.com/heat_transfer/thermal-conductivity-metals-alloys.htm; Thermal Conductivity of Some Common Materials and Gases http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html; Aluminium Oxide, Al₂O₃ Materials Characteristics <http://accuratus.com/alumox.html>; MAT-BASE <http://www.matbase.com/material/polymers/commodity/hdpe/properties>.

SUMMARY**PHOTOACOUSTIC RESPONSE OF THIN FILMS – THERMAL MEMORY INFLUENCE**Mioľjub Nešić¹, Marica Popović¹, Zoran Stojanović¹, Zlatan Šoškić², Slobodanka Galović^{1–3}¹*University of Belgrade, Institute for Nuclear Sciences Vinča, Serbia*²*University of Kragujevac, Faculty of Mechanical Engineering Kraljevo, Serbia*³*Bogolyubov Laboratory for Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

(Scientific paper)

On the basis of the generalized photoacoustic response model, which includes the influence of thermal memory on both thermoconducting and thermoelastic components, photoacoustic response of thin films is analysed. It is demonstrated that the influence of thermal memory is manifested at frequencies above certain boundary frequency, which depends on thermal memory properties of the sample and its depth. A linear relation, linking heat propagation velocity and measured signal, is derived. Taking into account the confinement of the frequency range imposed by the measuring system, it is indicated that thermal memory properties of non-crystalline thin films can be determined in a photoacoustic experiment.

Keywords: Photoacoustics • Thermoelastic bending • Thermal memory • Thin film