

**SENZORI S POVRŠINSKIM  
AKUSTIČKIM TALASOM****SURFACE ACOUSTIC  
WAVE SENSORS**Marija Hribšek<sup>1</sup>Slavica Ristić<sup>1</sup>Jelena Ilić<sup>2</sup><sup>1</sup>*Institut Goša, Beograd*<sup>2</sup>*Mašinski Fakultet, Beograd*

*Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta TR 11026.*

**REZIME**

*U radu je dat pregled senzora u čijoj osnovi se nalaze filtri s površinskim akustičkim talasom. Objavljeni su principi na kojima se zasniva funkcionisanje ovih senzora i njihov razvoj. Posebna pažnja je posvećena široko i raznovrsnoj primeni filtara s površinskim akustičkim talasom u hemijskim i biološkim sensorima.*

**Ključne reči:** *filtrar sa površinskim akustičkim talasom, senzori*

**ABSTRACT**

*The review of sensors based on surface acoustic wave filters is presented. The fundamental principles of sensors and historical development are explained. The special attention is paid to wide and different applications of surface acoustic wave filters in chemical and biosensors*

**Key words:** *surface acoustic wave filter, sensors*

**1. UVOD**

Savremeni elektronski uređaji su deo svih sistema za tehničku dijagnostiku. Senzori koji se ugrađuju u te sisteme detektuju različite fizičke, hemijske, biološke i mehaničke pojave. Jedna velika grupa savremenih senzora su elektroakustički senzori, čiji je rad baziran na prostiranju površinskih akustičkih (mehaničkih) talasa u piezoelektričnom materijalu.

Piezoelektrični efekat je otkriven krajem devetnaestog veka (1880) i od tada se koristi u mnogim oblastima nauke i tehnike. Prvi materijal sa piezoelektričnim efektom je bio kristal kvarca. U Bell Lab., 1949. godine otkriven je drugi piezoelektrični materijal *LiNbO3* koji se i sada široko primenjuje. Početak primene piezoelektričnog efekta je vezan za sonore i za izradu stabilnih oscilatora u radio predajnicima. Lord Rejli je takođe krajem prošlog veka (1885) otkrio površinske akustičke talase (PAT) proučavanjem seizmičkih talasa. Šezdesetih godina prošlog veka otkriveni su interdigitalni pretvarači (interdigital transducer IDT), koji omogućavaju pobuđivanje mehaničkih talasa u piezoelektričnom materijalu električnim signalom. R.M.White i Voltmer,

1965. godine, su prvi počeli da ih koriste za izradu filtra na bazi površinskih akustičkih talasa. Tada počinje intenzivni razvoj elemenata koji koriste površinske akustičke talase (PAT, (surface acoustic wave SAW)).[1-3] Kod ovih elemenata električni signal se pretvara u akustički talas, da bi se nakon određenog vremena ponovo pretvorio u električni. Amplitudska karakteristika ovih elemenata je tipa filtra propusnika opsega učestanosti, pa se stoga ovi elementi često nazivaju filtrima.

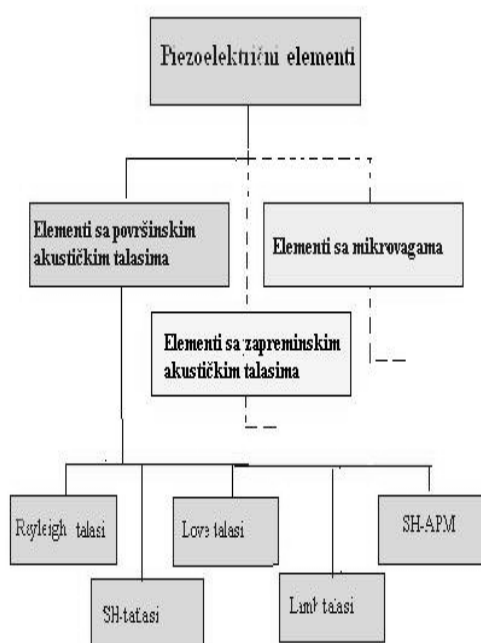
Od 1970.godine najzanimljivija je bila primena ovih filtara u telekomunikacijama, radio i TV sistemima i uređajima. Osamdesetih godina prošlog veka počinje razvoj senzora na bazi PAT filtara.

Filtri sa površinskim akustičkim talasima su dostigli visok stepen razvoja i značajne civilne i vojne primene. Danas je primena PAT filtara vrlo široka. Koriste se u uređajima široke potrošnje (TV aparati, bežični telefoni, mobilni telefoni, alarmni kućni sistemi), GPS sistemima, digitalnoj kablovskoj televiziji, radarskim sistemima, satelitskim telekomunikacijama, kao i u obradi signala u realnom vremenu. Industrija telekomunikacija je najveći potrošač PAT filtara sa približno 3 milijarde PAT

filtera godišnje, prvenstveno za mobilne telefone, bazne stanice, radare, zatim u oblasti radio frekvencija, oscilatora za TV prijemnike, kao i u obradi signala.

Najjednostavnija podela piezoelektričnih senzora, prema načinu kojim se prenose elektrooptičke i akustičke pobude, je prikazana na slici 1.

Akustički senzori se mogu svrstati u tri glavne kategorije: senzori s površinskim akustičkim talasom (PAT, SAW), gde se talas širi samo po površini materijala, zapreminski akustički senzori (ZAT, BAW), gde se talas širi kroz ceo materijal, i senzori na bazi mikrovagica. U ovom radu su analizirani samo senzori sa površinskim akustičkim talasima [1-4].



Slika 1 Podela piezoelektričnih elemenata

Osim u oblasti tehničke dijagnostike, uređaji koji koriste PAT filtere nalaze široku primenu u bio-hemijskoj tehnologiji senzora, senzora za merenje temperature, pritiska itd.

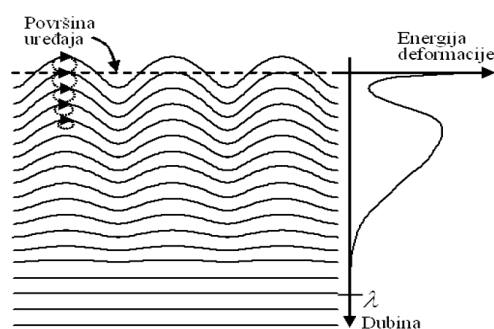
Razvoj i primena PAT senzora u medicini i zaštiti životne sredine je naročito porasla posle velikih terorističkih napada s kraja 20. i početka 21. veka. Među njima značajno mesto zauzimaju senzori prisustva hemijskih supstanci kao što su bojni, a naročito nervni otrovi kao i senzori bioloških agenasa, kao što su antraks, i drugi bacili. Brojne su i druge industrijske i komercijalne primene PAT senzora (senzori pare, vlažnosti, temperature i mase). PAT senzori imaju konkurentne cene, sami po sebi su postojani i pouzdani, kompaktni, malih dimenzija i vrlo su osetljivi. Mogu da se realizuju tako da budu i pasivni i bežično povezani (preko antene).

## 2. PRINCIP RADA FILTERA SA POVRŠINSKIM AKUSTIČKIM TALASIMA

Ovde je ukratko objašnjen princip rada PAT filtera, način njihove izrade i najvažnije primene.

### 2.1 Površinski akustički talasi

Kretanje površinskog akustičkog talasa, koje je otkrio Lord Rejli i opisao njegova svojstva i ponašanje, je ilustrovano na slici 2. Ova vrsta talasa je i dobila ime po njemu – Rejljevi talasi. Oni, poput talasa na površini vode i seizmičkih talasa imaju i longitudinalnu i transverzalnu komponentu, što znači da čestice materijala imaju eliptične putanje (sl. 2).



Slika 2. Ilustracija promene amplitude kod PAT elemenata

Osim klasičnih Rejljevih talasa, mogu se javiti i neke druge vrste površinskih talasa, zavisno od materijala, načina njegovog sečenja i graničnih uslova. Transverzalni ili smičući talasi mogu da budu polarisani tako da se čestice podloge pomeraju normalno na podlogu kao kod Rejljevog talasa (smičući vertikalni talas). Transverzalni talas može da bude polarisan i tako da se čestice kreću paralelno sa podlogom (smičući horizontalni talas – shear horizontal SH-SAW, (sl. 1). Sreću se takođe i tzv. cureći PAT (leaky – LSAW), kao i Love talasi koji su naročito pogodni za biosenzore [5].

Brzina prostiranja površinskih talasa je reda veličine  $10^3$  m/s (3000 do 5000 m/s – pet redova veličine manja od brzine elektromagnetnih talasa) i oni spadaju u najsporije talase u čvrstim telima. Zbog toga pomoću njih mogu da se dobiju linije za kašnjenje reda mikrosekundi vrlo malih dimenzija, u odnosu na linije za kašnjenje elektro-magnetskih talasa. Uobičajena vrednost amplituda ovih talasa je reda nanometra, a talasne dužine su im u opsegu od  $1\mu\text{m}$  do  $100\mu\text{m}$ . Tipični PAT senzori rade na frekvencijama od 10 MHz do 3 GHz (11 GHz).

Kao što se vidi na slici 2, praktično sva energija talasa (95%) je vezana za površinski sloj materijala debljine do jedne talasne dužine.

## 2.2 Piezoelektrični materijali za PAT senzore

Svi PAT filtri i senzori koriste piezoelektrične materijale. Piezoelektrični efekat predstavlja pojavu naelektrisanja na površini materijala kada je on izložen dejstvu mehaničkog naprezanja. Taj proces je i povratan: primenom određenog električnog polja na piezoelektrični materijal stvara se mehaničko naprezanje. Kod piezoelektričnih PAT elemenata se primenjuje promenljivo (oscilujuće) električno polje da bi se proizveo mehanički talas koji se prostire kroz piezoelektričnu podlogu, a zatim se on ponovo prevodi u električni signal koji se registruje.

Pri izboru materijala za PAT senzore potrebno je tražiti materijal koji ima veliki koeficijent elektromehaničke sprege, značajnu faznu brzinu površinskog talasa, i nizak temperaturski koeficijent (osim ako nije u pitanju PAT senzor temperature) [6].

Od materijala koji mogu da se koriste za piezoelektrične podloge, kod PAT filtera i PAT senzora, najčešće se koristi kvarc ( $\text{SiO}_2$ ). Temperaturski koeficijent kvarcne podloge ima široki minimum na sobnoj temperaturi pa se zato kod nje uticaj temperature često zanemaruje. Zatim se koriste: litijum niobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) i litijum tantalat ( $\text{LiTaO}_3$ ), galijum arsenid ( $\text{GaAs}$ ) i galijum fosfat ( $\text{GaPO}_4$  – primenljiv čak do  $1000^\circ\text{C}$ ), silicijum karbid ( $\text{SiC}$ ), langasit ( $\text{LGS} - \text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , takođe pogodan za visoke temperature), zink oksid ( $\text{ZnO}$ ), aluminijum nitrid ( $\text{AlN}$ ) i aluminijum fosfat ( $\text{AlPO}_4$ ), litijum tetraborat ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), olovo cirkonijum titanat ( $\text{PZT}$ ) i poliviniliden fluorid ( $\text{Pvdf}$ ).

Frekvencija na kojoj rade PAT fitri na klasičnoj piezoelektričnoj podlozi je oko 1 GHz, a ograničena je najvećim delom zbog rezolucije opričke litografije. Postoji nekoliko načina kako da se poveća radna frekvencija. Prvo može da se smanjuje talasna dužina, odnosno period IDT, drugo da se koriste podloge sa većom brzinom prostiranja akustičkih talasa ili da se koriste drugi modovi prostiranja talasa. Prema sadašnjim istraživanjima najperspektivnija opcija je korišćenje drugih materijala za podlogu kao što su: silicijum, safir,  $\text{SiC}$  ili dijamant. Dijamant ima najveću brzinu prostiranja akustičkih talasa ( $V_L=17,52(\text{km/s})$  i  $V_T=12,82(\text{km/s})$ ), nije piezoelektričan ali se koristi u kombinaciji sa tankim filmom od piezoelektričnog materijala.  $\text{AlN}$  ima brzinu prostiranja  $V_L=11,37(\text{km/s})$  i  $V_T=6,09(\text{km/s})$ , dok kvarc ima  $V_L=5,96(\text{km/s})$  i  $V_T=3,31(\text{km/s})$ .

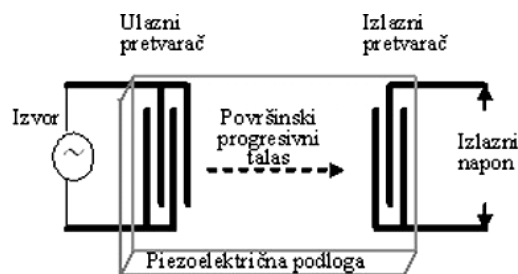
## 2.3 Princip rada

Tipični PAT filter sadrži jedan ili više pretvarača električne u mehaničku energiju i obrnuto. Ti pretvarači se izrađuju u vidu dva niza metalnih elektroda u obliku češlja čiji se zupci i- elektrode međusobno uvučeni jedni u druge (sl.3, 4 i 5), zbog čega

se i zovu interdigitalni pretvarači (IDP-IDT – interdigital transducer). Širine elektroda su reda veličine od nekoliko mikrometara do dela mikrometra. Prostorni period elektroda tj. rastojanje između dve susedne elektrode je konstantno i definiše talasnu dužinu PAT. Ovo rastojanje je jednako polovini talasne dužine površinskog akustičkog talasa. Na slikama 3, 4 i 5 pretvarači imaju po 2-3 elektrode, dok je u praksi taj broj obično veći (nekoliko desetina) [7]

Pomoću interdigitalnih pretvarača se prave različiti PAT filtri koji mogu da se svrstaju u dve grupe:

1) Transverzalni PAT filtri sa progresivnim talasom. To su ustvari linije za kašnjenje. Kod njih se kao izlazna veličina očitava vreme kašnjenja (propagacije) ili faza ili amplituda izlaznog napona. (sl. 3).

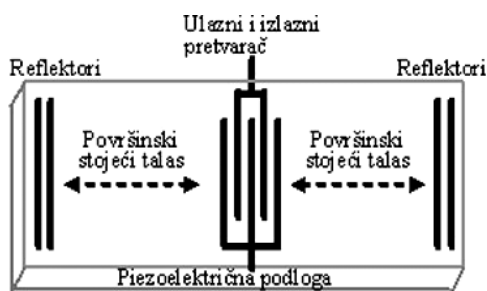


Slika 3: Skica transversalnog PAT filtra – senzora tipa linije za kašnjenje.

2) PAT filtri sa stojećim talasima kod kojih se kao izlazna veličina očitava sopstvena frekvencija, odnosno frekvencija stojećeg talasa koji se formirao. To su filtri rezonantnog tipa.

Tipični filter prve grupe, sadrži dva pretvarača. Ulazni pretvarač obezbeđuje električno polje dovoljno jako da može da proizvede pomeraj u molekulima podloge i proizvede mehanički talas. Taj talas se prostire po podlozi i stiže do izlaznog pretvarača, koji energiju mehaničkog talasa prevodi ponovo u periodično promenljivo električno polje. Način prostiranja ovakvog talasa zavisi od karakteristika materijala podloge i geometrije pretvarača, ali i od okoline. PAT filtri upravo i mogu da budu senzori zato što je prostiranje akustičkih talasa osetljivo na promene različitih svojstava sredine u kojoj se on nalazi. Rastojanje između ulaznog i izlaznog pretvarača je obično nekoliko milimetara. To što su PAT senzori mali znači da, osim što mogu da se stave praktično bilo gde, brzo reaguju na promene uslova okoline (u smislu dinamičkog ponašanja, vremenska konstanta im je mala). Dok je za potrebe telekomunikacija, dužina propagacije talasa od nekoliko milimetara sasvim dovoljna, kod PAT senzora je ponekad poželjno da ona bude duža, jer se na taj način povećava osetljivost senzora.

Kod druge vrste PAT filtera pretvarač se nalazi na sredini podloge. On služi i kao ulazni i kao izlazni pretvarač. U njemu se, ili direktnom vezom ili preko antene, formira električni signal. Taj signal proizvede mehanički talas u piezoelektričnoj podlozi koji od pretvarača putuje na obe strane, nailazi na niz metalnih traka-reflektora (kojih ima više nego na slici 4) i od njih se odbija. Ako ulazni električni signal sadrži napon sopstvene frekvencije elementa, na prostoru između pretvarača i reflektora, koji čini rezonator (rezonantnu šupljinu), formira se stojeći talas. Dakle, ulazni impuls u sebi treba da sadrži i moguće sopstvene frekvencije elementa.



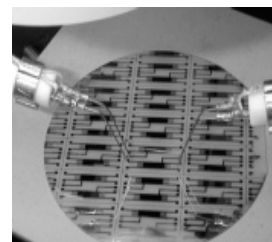
Slika 4. PAT filter rezonantnog tipa

Sopstvene frekvencije zavise od geometrije pretvarača i brzine prostiranja površinskog talasa, a brzina zavisi od vrste piezoelektrične podloge, načina izrade i ambijenta u kome se filter nalazi.

## 2.4 Način proizvodnje

PAT filteri imaju relativno niske cene zato što se za njihovu proizvodnju koriste tehnološki postupci već dobro razvijeni u izradi integrisanih kola: fotolitografija i metalizacija. Proizvodnja počinje čišćenjem i glačanjem piezoelektrične podloge, na koju se zatim ravnomerno nanese sloj metala (obično aluminijuma), a potom i sloj fotorezista sa kojim se peče da bi fotorezist očvrsnuo. Posle toga se površina prekrije maskom kod koje neprovidni delovi predstavljaju mesta na kojima treba da ostane metal (metalne elektrode) i izlaže se ultraljubičastom zračenju. Ozračeni deo površine se hemijski promeni tako da on može da se ukloni pomoću razvijaača, a zatim da se ukloni metal koji je bio ispod njega. Na kraju se ukloni i preostali fotorezist.

Na slici 5 je prikazan kružna podloga od litijum tantalata prečnika  $\Phi=70\text{mm}$ , debljine  $d=35\mu\text{m}$  na kojoj se nalazi 14 PAT filtera. Elektrode IDT-a su  $5\mu\text{m}$  široke i nalaze se na isto tolikom rastojanju. Prikazani PAT element je dobijen po postupku koji je opisan. Filteri su projektovani za rad u SH-SAW modu na oko 206 MHz. Posle temeljne pripreme, iznad sloja titanijuma (30nm) nanet je sloj zlata (100nm) [8].



Slika 5 Izgled podloge sa 14 filtera

Za izradu elektroda se obično koristi aluminijum, ali ako je za PAT filter bitno da je otporan na koroziju onda se koristi zlato. U tom slučaju se, zbog dobrog prijanjanja, na podlogu prvo nanosi hrom ili titanijum [9].

## 2.5 Kratak osvrt na karakteristike PAT filtera

PAT filteri mogu obavljati veoma raznovrsne funkcije u savremenim telekomunikacionim uređajima i sistemima, u procesiranju signala i senzorima različitog tipa u širokom frekvencijskom opsegu od 10MHz do blizu 11GHz. Oni se koriste kao integralni delovi složenih uređaja u tehničkoj dijagnostici: kao linije za kašnjenje sa konstantnim i disperzivnim kašnjenjem, filteri propusnici opsega sa fiksnim i promenljivim opsegom, koderi, dekoderi i multiplekseri, rezonatori i osnovni delovi oscilatora, prilagođeni filteri različitim vrstama signala, konvolveri i korelatori i sintetizatori učestanosti. Ovi filteri se prave kao propusnici vrlo uskog, ali i vrlo širokog opsega, sa relativnim propusnim opsezima od 0,1 do 0,66. Glavni nedostatak ovih filtera je njihovo veliko uneseno slabljenje često i 25 dB, mada se posebnim tehnikama može svesti na svega 7 do 10 dB.

Analizom primene, kako linearnih, tako i nelinearnih PAT elemenata, ustanovljeno je da se oni koriste za realizaciju mnogih korisnih funkcija u procesiranju signala kao što su konvolucija, korelacija, kompresija i ekspanzija signala te prilagođeno filtriranje.

Implementacijom Furijeove transformacije PAT kolima i kombinacijom više Furijeovih PAT procesora omogućeno je dobijanje vrlo složenih analognih signal procesora. Pokazano je da se njihovom primenom mogu realizovati vrlo sofisticirane funkcije u obradi signala, kao što je kepralna analiza, spektralna analiza, promenljivo kašnjenje itd. i da su našli značajnu primenu u oblastima kao što su radari sa kompresijom impulsa (Doplerovi procesori itd.) ili komunikacije u proširenom spektru (disperzivne linije za kašnjenje). Može se konstatovati da iako se širok spektar PAT elemenata koristi u savremenim telekomunikacijama, ova oblast je i dalje u intenzivnom razvoju zahvaljujući njihovim dobrim osobinama. Posebno veliko interesovanje vlada za pri-

---

---

menu ovih komponenata u savremenim vojnim telekomunikacijama, u sistemima za elektronski rat, u ometačkim i izviđačkim uređajima te kompresivnim prijemnicima. Stoga se očekuje da će njihova primena i dalje biti u ekspanziji.

Danas se u svetu primenjuje širok spektar metoda projektovanja, modelovanja [10-14], izbora materijala i tehnologija za poboljšanje karakteristika PAT filtera. Istraživanja se odvijaju uglavnom u nekoliko pravca. Jedan je u poboljšanju tehnologije izrade, na primer koriste se: elektronska, laserska, jonska litografija, novi materijali za podloge i pretvarače, površinski osetljive podloge itd. Drugi je u poboljšanju metoda projektovanja i analize rada filtera.

Napredak u oblasti PAT tehnologije je omogućio razvoj akustičkih komponenata visokih performansi čije se dobre osobine mogu rezimirati u sledećem:

- a) mogu obavljati veliki broj različitih funkcija bez naročitog podešavanja,
- b) izrada jednostavnim postupcima koji su kompatibilni s ostalim planarnim tehnologijama savremenih integrisanih kola, što omogućava njihovu proizvodnju s velikom preciznošću i reproduktivnošću karakteristika,
- c) ujednačenost karakteristika istih vrsta elemenata,
- d) frekvencijski opseg primene ovih elemenata je nedostupan za većinu drugih komponenata,
- e) fleksibilna upotreba PAT elemenata s TB proizvodom (propusni opseg puta vreme procesiranja) od više desetina hiljada koji omogućava kompleksno procesiranje signala,
- f) male dimenzije i dobar dinamički opseg (100dB),
- g) pasivnost
- h) imunost na različite tipove zračenja.

U svetu postoji veliki broj firmi koje prave različite vrste PAT filtera, kao što su: Epkos, Andersen Laboratories, Murata, Boston Electronic Corp, Alcatel, Thompson CSF, Siemens, Sandia National Lab, Air Gate Technology, Com Dev Saw Products itd.

### 3. PRIMENA PAT FILTERA U SENZORIMA

Kako prostiranje talasa između dva pretvarača zavisi i od okoline u kojoj se PAT filter nalazi, to znači da se oni mogu primenjivati kao senzori parametara okoline.

Opseg pojava koje se mogu detektovati PAT filterima se još više proširuje ako se površina između pretvarača prekrije tankim slojem materijala čija se masa, elastičnost ili provodnost menja pod dejstvom fizičkih ili hemijskih agenasa iz okoline. Tako na

primer, PAT senzori, kod kojih se menja prostiranje površinskih talasa ako su izloženi promenljivom naponu naprezanja, mogu da se koriste kao senzori pritiska, sile, momenta sprega sila, mase ili udara. Ako se PAT senzor prekrije slojem koji apsorbuje određene hemijske supstance u parnom stanju, ili biološke supstance u tečnom stanju, masa sloja raste proporcionalno koncentraciji ispitivane supstance i time menja brzinu prostiranja površinskih talasa. Na taj način PAT filteri postaju hemijski ili biološki senzori. Brzina prostiranja površinskih talasa zavisi od temperature. Zahvaljujući tome, proizvode se temperaturni PAT senzori. Ti temperaturni senzori imaju rezoluciju reda milistepena, dobru linearnost i mali histerezis. Da bi se eliminisali ostali uticaji okoline ove senzore i oni su hermetički zatvoreni, ali bez termičke izolacije.

Danas se u svetu sprovode obimna istraživanja novih primena PAT filtera u veoma različitim oblastima, kao što su oblast biosenzora, senzora za detekciju radiološko-biološkog i hemijskog zagađenja sredine, termosenzora, senzora za merenje vlažnosti, za merenje pritiska itd.

Prednost korišćenja PAT je kraća talasna dužina u odnosu na elektromagnetni signal sa istom frekvencijom i manja energija u odnosu na EM sa istom talasnom dužinom.

Prvi akustički senzori su bile kvarcne kristalne mikrovage. One se izrađuju od kvarcnih kristala. U početku su se koristile za stabiliziranje frekvencije radio odašiljača, a kasnije su oblagane sorptivnim filmom i kao takvi su korišćeni u oblasti senzora. Sledeći važan korak u akustičkim sensorima je kasnih 1970-ih, kada su napravljeni prvi hemijski gasni senzori na bazi PAT filtera. Ovi senzori za detekciju koriste PAT liniju za kašnjenje.

Danas se koristi još nekoliko tipova elektroakustičnih senzora koji se razlikuju prema modu širenja akustičnih talasa u piezoaktivnoj sredini. To su senzori sa zapreminskim akustičnim talasima i senzori sa talasima koji se generišu savijanjem pločica od piezoelektričnog materijala.

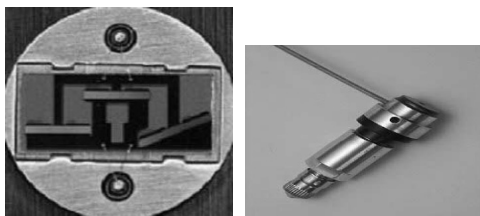
Uređaji koji u osnovi koriste, akustički talas za očitavanje elektrohemijskih procesa nalaze široku primenu u biohemijskoj tehnologiji senzora. Danas se mnogo istražuje u oblasti novih materijala koji se nanose na piezoelektričnu podlogu i koji imaju visoku hemijsku stabilnost i bioinertnost, kao što je na primer dijamant [15].

#### 3.1 Senzori za merenje fizičkih veličina

Danas se već prave PAT senzori visokog kvaliteta za merenje temperature, pritiska, mehaničkog napona [16,17], kao i hemijski i biosenzori [18]. PAT senzori se koriste i u bežičnom praćenju po-

kretnih objekata posebno u nepristupačnom okruženju, na primer u livnicama gde se na rastojanju prati razvoj procesa [18].

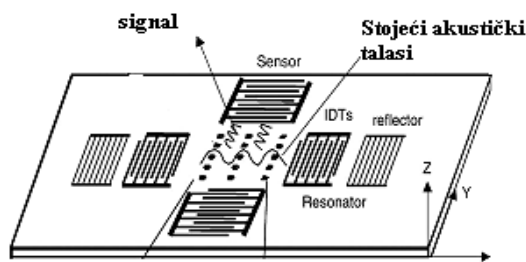
Unutrašnji i spoljašnji izgled senzora sa PAT elementom za merenje temperature i pritiska je prikazan na slici 6.



Slika 6. Izgled senzora za merenje temperature i pritiska

Koriste se za merenje protoka tako što se zagreju iznad ambientalne temperature i postave u struju fluida. Hlađenje konvekcijom uzrokuje promenu centralne frekvencije izlaznog signala.

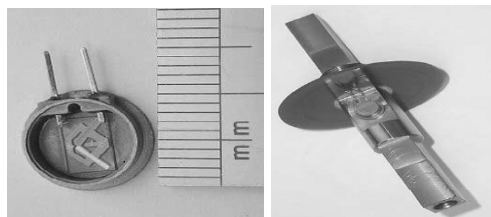
Interesantna je primena PAT filtera u girokopima. Pat žiro senzori se prave na  $128^\circ$  Y-sečenog  $\text{LiNbO}_3$  (sl. 7.). Koriolisove sile generišu sekundarne površinske akustičke talase koji su ortogonalni sa primarnim talasima.



Slika 7. Žiroskopski senzor

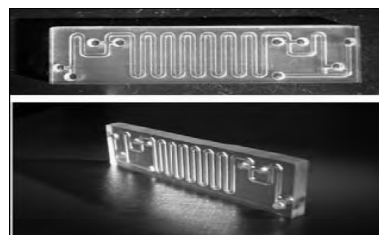
Među najznačajnije, spadaju primene PAT senzora u automobilske industriji gde se između ostalog koriste kao senzori momenta sprega sila (sl. 8), senzori pritiska i temperature u gumama. Merenje mehaničkih naprezanja se vrši na taj način što se komplet od tri PAT senzora postavlja tako da su dva na delovima koji trpe naprezanja, na primer osovine, a jedan na referentnom položaju. Deformacije koje prate podlogu se prenose na senzore, koja se sa jedne strane širi, a sa druge komprimuje. Zbog toga se menja srednja frekvencija izlaznog signala. Signal se prenosi bežično. Obrada se vrši kompariranjem srednjih frekvencija i amplituda signala. Pasivni PAT senzori danas se ugrađuju u gume za kontrolu pritiska i temperature. Njihova primena u automobilske industriji je poboljšala kontrolu, ekonomičnost i bezbednost vozila u saobraćaju.

Još veći značaj ima primena pasivnih bežičnih PAT senzora za bezbednu vožnju vozova velikih brzina. [19]



Slika 8. Senzora sa PAT elementima za merenje torzije

Posebna grupa senzora su oni koji se koriste za merenje u tečnim sredinama. PAT senzori detektuju organofosfate, hlorne ugljovodonike, ketone, alkohole, aromatične ugljovodonike, zasićene ugljovodonike i vodu [7]. Mogu da budu mikronskih dimenzija, a za njih je specifična zaštita IDT od korozije i drugih štetnih efekata u tečnom fluidu. Ranijih godina su se koristile specijalne čelije gde se montirao senzor, a danas najsavremenijom tehnologijom se izrađuju senzori sa polimerskom zaštitom (sl.9). Osim za detekciju hemijskih agenasa u tečnim fluidima, danas postoje uređaji na bazi PAT elemenata koji se koriste za merenja napona smicanja u turbulentnoj struji [20].



Slika 9. Polimerski chip izrađen stereolitografijom [20]

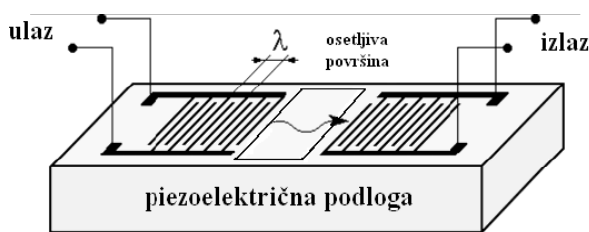
Jedno skorašnje rešenje sa velikom osetljivošću površinom, tj. kašnjenjem, je PAT senzor u obliku lopte prečnika 3,3mm oko koje površinski akustički talas obiđe više puta pre nego što se registruje na izlaznom pretvaraču. Ipak treba naći kompromisnu dužinu propagacije talasa pri kojoj ne dolazi do značajnog slabljenja njegovog intenziteta, a postiže se dovoljna osetljivost [21].

### 3.2 Hemijski senzori

Hemijski senzori na bazi PAT elemenata predstavljaju jedna velika grupa senzora koja se može razvrstati prema tome da li su transverzalni ili rezonatorski, da li se koriste za detekciju gasovitih ili tečnih reagenasa, na kojoj podlozi su rađeni itd.

Osnovna konfiguracija transverzalnog PAT hemijskog gasnog senzora prikazana na slici 10, se dobija kada se između interdigitalnih pretvarača filtra sa slici 3 na gornju površinu piezoelektrične podloge nanese tanak sloj hemijski osetljivog materijala (najčešće polimer). Rad gasnog PAT senzora se zasniva na reverzibilnoj apsorpciji gasa ovim

osetljivim materijalom. Osetljivost ovih senzora je velika jer registruju promene mase na površini reda  $100 \text{ pg/cm}^2$ .



Slika 10. Transverzalni PAT senzor - senzor tipa linije za kašnjenje

Električni signal priključen na ulazni IDP prouzrokuje pojavu površinskog akustičkog talasa koji se kreće u oba smera od pretvarača po površini podloge. Zbog toga se na ivice podloge nanosi materijal koji apsorbira akustički talas, koji ide prema ivici i koji bi mogao od nje da se odbije i prouzrokuje smetnje, što nije prikazano na slici 1. Kao što je već napred rečeno, amplituda talasa opada sa dubinom po eksponencijalnom zakonu, tako da je praktično cela energija talasa sadržana u gornjem sloju podloge debljine jedne talasne dužine pobudnog signala.

Izlazni signal je napon na opterećenju izlaznog IDP-a. Masa i viskoznost tankog sloja utiču na promenu brzine i slabljenja. Tanki sloj polimera apsorbira gas tako da će se srazmerno količini apsorbovanog gasa dodatno promeniti brzina i faza akustičkog signala. Interdigitalni pretvarači su jednaki, sa uniformno raspoređenim elektrodama istih dužina. Rastojanje između elektroda je jednako širini elektroda. Broj elektroda i njihova dužina određuju ulaznu otpornost IDP-a, a samim tim i parametre mreže za prilagođenje na ulaznim i izlaznim električnim priključcima. Prilagođenje na otpornost opterećenja odnosno generatora se projektuje na centralnoj učestanosti filtra  $f_0$ . Minimalno slabljenje jednog IDP-a u uslovima prilagođenja iznosi 6 dB. Talasna dužina koja odgovara centralnoj učestanosti je jednaka rastojanju centara elektroda istog polariteta. Centralna frekvencija i propusni opseg su, znači, određeni geometrijom IDP-a i osobinama piezoelektrične podloge [14-16].

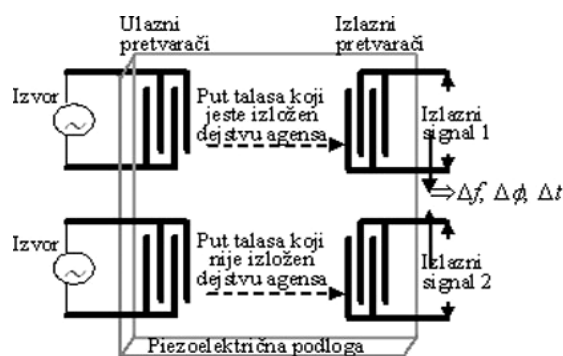
Piezoelektrična podloga je najčešće kvarc. Hemijski senzori rade na srednjoj frekvencija oko 100MHz. Brzina prostiranja i slabljenje površinskih akustičnih talasa zavisi od viskoznih i elastičnih osobina osetljivog sloja na površini podloge, kao i od njegove mase. Ove osobine se menjaju sa količinom apsorbovane supstance koja je u kontaktu sa osetljivom površinom. Senzori obično imaju ugrađene grejne elemente uz pomoć kojih se vrši desorpcija.

Proizvođači hemijskih senzora za specijalne namene koriste umesto kvarca podloge od GaAs,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ , i GaP. Izrađuju se senzori koji rade pri veoma visokim temperaturama i preko  $1000^\circ\text{C}$ . Uređaji su prenosivi i opremljeni softverom za dobijanje podataka u realnom vremenu. Hemijski osetljivi sloj se obično izrađuje od čistih ili pomešanih plemenitih metala, različitih polimera, itd. u veoma tankom filmu sa debljinom reda nekoliko nm.

Selektivnost senzora zavisi od izbora polimera. Nalaženje optimalnog polimera za odgovarajući gas je jedan od osnovnih zadataka proizvođača hemijskih PAT senzora

Hemijski PAT senzor rezonatorskog tipa se dobija kada se na površinu rezonatorske šupljine filtra sa slike 4 nanese osetljivi sloj. Vrednost frekvencije izlaznog signala formiranog talasa daje podatak o veličini na koju senzor reaguje. Ovaj tip senzora je nešto novijeg datuma u odnosu na prvi koji se još uvek češće primenjuje. Prednosti rezonantnih PAT senzora u odnosu na one sa linijom za kašnjenje je to što je kod njih bolji faktor dobrote Q, slabije prigušenje, niži šum, manja zapremina i cena [18].

Problem kod PAT senzora oba tipa je što su podložni uticaju mnogih faktora sredine, kao što su promene spoljašnje temperature i vlažnosti, oksidacija, električni i mehanički šum. Zbog toga se, skoro obavezno, često koristi diferencijalni način merenja sa referentnim senzorom u istim ostalim uslovima, ali na koji ne utiče merena veličina. Kao izlazni podatak se koristi razlika frekvencija električnih signala sa izlaznih pretvarača mernog i referentnog senzora, ili razlika njihovih faza, ili razlika vremena propagacije ova dva signala. Na taj način se povećava osetljivost senzora i eliminiše dejstvo nekih neželjenih faktora (npr. fluktuacije temperature). Na slici 11 je prikazana šema principa rada diferencijalnog PAT senzora sa dve linije za kašnjenje (dual delay line SAW device) [22].



Slika 11. PAT senzor diferencijalnog tipa

Ulazni, odnosno izlazni pretvarač kod bilo kog od ova dva senzora, ne mora da bude direktno

vezan za izvor, već se može napajati preko antene sa udaljenog izvora. Na taj način se dobijaju radio PAT senzori pogodni za daljinska merenja, što je naročito pogodno kada treba postaviti senzor na mesto koje je teško pristupačno ili u surove uslove okoline (visoka temperatura, otrovna sredina).

Hemijski gasni senzori su našli brojne primene zbog svojih malih dimenzija, pasivnosti, velike osetljivosti i stabilnosti, niske cene, brze reakcije, a iznad svega zbog mogućnosti implementacije u složeni sistem za obradu podataka. [18,23].

Ovi senzori se koriste u sistemima za bežično merenje koncentracija otrovnih gasova, kao i u *in-situ* monitoring isparljivih organskih jedinjenja u zemlji i vodi. NASA u svojim sistemima za monitoring zagađenja gasovima organskog porekla u prostorijama gde se prave svemirska vozila takođe koristi ovakve senzore.

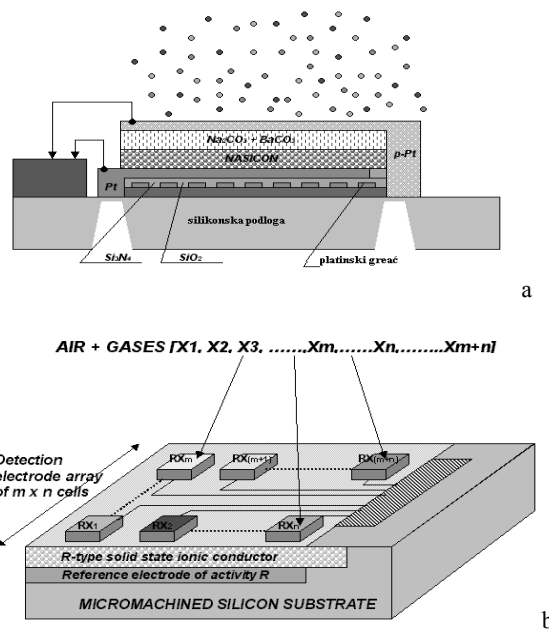
Prvi senzor ovog tipa je napravljen 1979.godine. Kao primer dokle se stiglo sa razvojem hemijskih senzora na bazi PAT elemenata, navodi se deo proizvodnog programa Sandia National Laboratories, koji su još pre desetak godina razvili senzore za detekciju i identifikaciju preko 14 organskih komponenti sa sigurnošću od 98% i tačnošću od 96%, za više od 21 smeše sa po sedam komponentata [24]

Iako su hemijski senzori za detekciju CO<sub>2</sub> razvijeni među prvima, oni se i danas usavršavaju. Pronalaze se nove aktivne supstance, smanjuje se debljina aktivnog sloja, a povećava njihova osetljivost. Koristi se, na primer, sloj od teflona AF 2400 kod pasivnog, bežičnog senzora sa frekvencijom 440 MHz. Podloga je 41° YX LiNbO<sub>3</sub>. Senzor je linearan, temperaturno stabilan i za koncentracije CO<sub>2</sub> od 0–450 ppm, ima osetljivost 1,98°/ppm. [25]

Savremeni trend razvoja hemijskih senzora uključuje korišćenje nanotehnologija. Na primer, na podlogu od kvarca se nanosi sloj SiO<sub>2</sub>, za izolaciju elektrode od sloja ugljeničnih nanocevi koji je aktivan senzorski sloj. Sloj od fullerena se koristi za detekciju organskih isparenja. Nanotehnologije su primenjene i pri izradi senzora za vodonik koji imaju osetljivi sloj sačinjen od amornog TiO<sub>2</sub> dopiranog koloidnim zlatom, sol-gel tehnologijom na podlozi 64° YX LiNbO<sub>3</sub>. [26]

Veoma mnogo se razvijaju višeslojni hemijski senzori koji imaju veću osetljivost i mogućnost istovremene detekcije različitih reagenasa i istovremenu upotrebu u gasnim i tečnim sredinama.

PAT elementi su našli široku primenu u izradi mikro-elektro-mehaničkih sistema (MEMS) i u sklopu tehnologije tankog filma za integrisana mikro-elektronska kola. Danas se prave multisenzorske platforme koje se koriste kao hemijski gasni senzori (sl.12) [27].



Slika 12. PAT senzori u MEMS tehnologiji

U prenosivim uređajima za detekciju hemijskih reagenasa obično ima više senzora sa različitim aktivnim premazima, koji istovremeno mogu da detektuju različite supstance. Osim identifikacije, oni pokazuju i koncentraciju. Pored industrijske i vojne primene, ovi senzori su nezamenjivi u ekološkom monitoringu. Na slici 13 su dati primeri komercijalnih senzora na bazi PAT elemenata.



Slika 13. Primeri prenosivih kompaktnih senzorskih uređaja na bazi PAT elemenata

Posebna grupa hemijskih senzora sa PAT elementima koja pokazuje koliko su se oni infiltrirali u svaku dijagnostičku aktivnost su, na primer, senzori koji sa preko 86% tačnosti određuju iz koje geografske oblasti potiče grožđe od koga je proizvedeno vino [28].



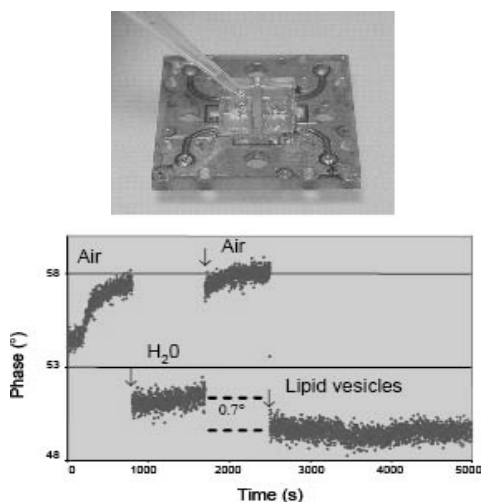
### 3.3 Biosenzori

Biosenzori na bazi PAT filtera su veoma atraktivni jer ispunjavaju naučne i komercijalne zahteve za jednostavnu i pouzdanu upotrebu. Ovi uređaji su najosetljiviji u klasi gravimetriskih senzora. Aktivan sloj u senzoru stupa u interakciju sa biomolekulama na slobodnoj površini. Promena mase senzora dovodi do promene u frekvenciji izlaznog signala [18, 26, 29]. Najveći deo biosenzora radi sa horizontalnim talasima (SH-tip).

Danas se mnogo istražuje u oblasti novih materijala koji se nanose na piezoelektričnu podlogu i koji imaju visoku hemijsku stabilnost i bioinertnost, kao što je dijamant.

Danas se u mnogim značajnim svetskim laboratorijama radi na usavršavanju ovih senzora, njihovoj minijaturizaciji, optimizaciji zaštitnog sloja i njihovom korišćenju *in vivo*. Kao primer se navodi biosenzor na bazi PAT elemenata koji je razvijen (2006) u istraživačkom centru RTB u Francuskoj. [30] Dimenzije senzora su 3x4mm. Podloga je AT kvarc, ima Al elektrode, prekrivene slojem Si i slojem Au. Dijagram faze pokazuje kašnjenje od  $0,7^\circ$  u odnosu na  $H_2O$ , koje je rezultat stvaranja monomolekularnog sloja masti, (sl. 14).

Biosenzori sa SH-talasa uspešno su primenjeni za merenje koagulacije krvi tokom složenih operacionih zahvata, gde je neophodan pouzdan uređaj sa brzim odzivom koji *on line* daje podatke o merenim veličinama.



Slika 14. PAT biosenzor za merenja molekularne interakcije u tečnim sredinama (a) i dijagram promene faze indukovane lepljenjem masnog mehurića na osetljivi sloj.

Takođe se u literaturi mogu naći podaci da se minijturni uređaji na bazi PAT elemenata za bežični prenos podataka koriste i za merenje temperature *in vivo*.

### 4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani osnovni principi na kojima se zasniva funkcionisanje elektronskih komponenata na bazi PAT tehnologije. Pregled PAT elemenata, sa posebnim osvrtom na njihovu primenu obuhvata samo jedan deo koji zadnjih godina ima najveću ekspanziju, a to su senzori.

Poznavanje njihovih karakteristika otvara nove mogućnosti primene ovih elemenata u svim sistemima za dijagnostiku, u uređajima široke potrošnje, kao što su TV aparati, bežični telefoni, mobilni telefoni, alarmni kućni sistemi, zatim u GPS sistemima, digitalnoj kablovskoj televiziji, u radarskim sistemima, satelitskim telekomunikacijama kao i u obradi signala u realnom vremenu.

Posebno se danas širi i razvija njihova primena u sensorima.

### 5. LITERATURA

- [1] Morgan P. D., History of saw devices, IEEE Intl. Frequency Control Symposium, Pasadena, May, 1998
- [2] Hribšek M., Elementi sa površinskim akustičnim talasom i njihova primena, Tehnika-Elektrotehnika, god.31, str.1725-173, 1982
- [3] Hribšek M., Kola sa površinskim talasima - SAW, Nauka, Tehnika, Bezbednost, Vol.2, pp. 3-13, survey paper, 1995.
- [4] Hribšek, M.: Surface Acoustic Wave Devices and their applications, Proc. MIEL 86, Vol.1, pp. 37-46, Belgrade, invited paper, 1986,
- [5] Harris C.M., Anal.Chem. 75, 355-358, 2003
- [6] Atashbar M.Z.et al., Sens. Actuators B 175 u štampi, 2009
- [7] Rimeika R. et al., Sens. Actuators B 135 u štampi,
- [8] K.Mitsakakis, Microelectronic Eng., u štampi, 2009
- [9] Bhide T. M., Yamarthy C. S., Ellis C. D., and Cernosek R. W., Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Sensor Platform Development For Chemical And Biological Detection, ICCES'07 Miami, USA, 2007

- 
- 
- [10] Bender F. et al., *Anal.Chem.* 76, 3837-3840,2004
- [11] Debnath, N., Ajmera, J. C., Hribšek, M. F., Newcomb R.W., *Scattering and Admittance Matrices of SAW Transducers*, in *Circuits, Systems and Signal Processing*, Vol.2., No.2, pp.161-178,1983.
- [12] Hribšek,M., Tošić,D., *An Improved Algorithm for Analysis of Uniform SAW Transducers*, in *Proc. 26th Midwest Symposium On Circuits and Systems*, INAOE, Puebla, Mexico, pp.243-246, 1983,
- [13] Hribšek,M., Tošić,D., *An Improved algorithm for Analysis of SAW Pulse Compression Filters*, *Proc. 8th Microcoll*, Budapest, 1986, pp.373-374.
- [14] Hribšek, M., Popović, M., Vasiljević, D., *Design of reflective array compressor with metallic reflectors*, *Proc. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON'98*, Tel-Aviv, Vol.I, pp.875-877, 1998
- [15] Mortet, V., Williams O. A. and Haenen1 K., *Diamond: a material for acoustic devices*, *Phys. Stat. Sol. (a)* 205, No. 5, 1009–1020, 2008
- [16] Hribšek M., Tošić D., Živković Z., *Hemijski gasni senzori sa površinskim akustičkim talasom*, *Tehnika*, (u štampi), 2009
- [17] Pohl A. A., *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47, 317-332, 2000.
- [18] Golio, M., *The RF and Microwave Handbook*, Second Edition, CRC Press LLC: Boca Raton, USA. p. I.6.1-I.6.15. 2008,
- [19] Jaehwan K., Park J.H., *Saw Sensor for Train Wheel Monitoring*, *Engineering Materials Vols. 270-273* pp 921-926, 2004
- [20] Rapp, K. Länge, L. Carneiro, M. Rapp, *Surface Acoustic Wave (SAW) biosensor with fully automated microfluidic Flow Injection Analysis (FIA) system for biomedical applications*, *B.E. Sensors*, 9, 980-994, 2009
- [21] T.Nakamoto et al. *Sens. Actuators B* 130, 386-390, 2008
- [22] S.L. Rose-Pehrsson et al. *Anal. Chem.* 60,2801-2811, 1988
- [23] Hribšek M., *Elementi sa površinskim akustičkim talasima u radiosenzorima*, Telfor, OS 5.13, 2008
- [24] Clifford K. Ho, Michael T. Itamura, Michael Kelley, and Robert C. Hughes, *Review of Chemical Sensors for In-Situ Monitoring of Volatile Contaminants*, SANDIA REPORT, SAND2001-0643, Unlimited Release, Printed March, 2001
- [25] Wen Wang et al, *A novel wireless, passive CO2 sensor incorporating a surface acoustic wave reflective delay line*, *Smart Mater. Struct.* 16 1382-1389, 2007
- [26] Sadek Z.A., Buso D., Martucci A., Mulvaney P., Wlodarski W., and Kalantar-Zadeh K., *Titanium Dioxide-Based 64° YX LiNbO3 Surface AcousticWave Hydrogen Gas Sensors*, *Journal of Sensors*, Article ID 254283, 5 pages, 2008
- [27] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0010/Ivanov/Ivanov>, *Advanced Sensors for Multi-functional Applications*
- [28] Santos J.P., Fernández M.J., J.L. Fontecha, J. Lozano, M. Aleixandre, M. García, J. Gutiérrez and M.C. Horrillo, *SAW sensor array for wine discrimination*, *Sensors and Actuators B: Chemical* Vol. 107, Issue 1, 2006
- [29] Hribšek M., Ristić S., Živković Z., *Modelling of saw biosensors*, *Proceed. of Biodevices*, Barcelona 14-17. jan. 376-379, 2009.,
- [30] Ballandras S., Reinhardt A., Khelif A., Wilm M., Laude V., Daniau W., Blondeau-Patissier V., *Theoretical Analysis of Damping Effects of Guided Elastic Waves at Solid/Fluid Interfaces* *Journal of applied physics* 99, issue 5(5), 545-553, 2006